

# AEのフラクタル性を用いた鍛造用工具の 損傷・破壊の検出

静岡大学工学部機械工学科  
早川 邦夫

# 研究の目的・内容

## □ 目的

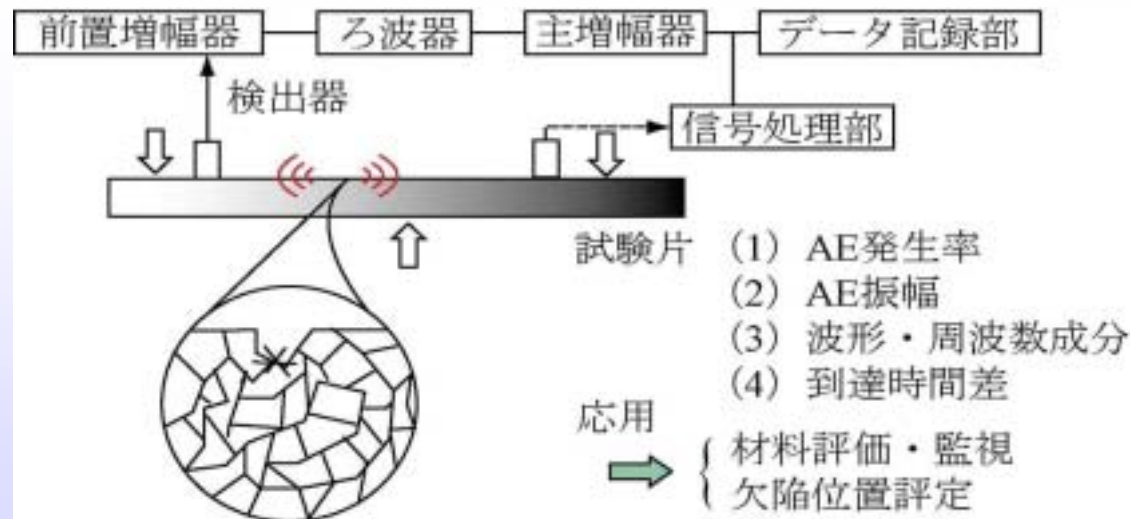
AEのフラクタル性を利用した冷間鍛造金型の損傷状態の即時的検出手法の確立

## □ 内容

1. AEのフラクタル性についての説明
2. 変形起因AEと破壊起因AEのフラクタル特性の特定
3. 繰返し鍛造によるAEのフラクタル性の変化に対する研究
4. 全AE信号から、金型起因AEを分離する手法の開発

# アコースティック・エミッション(AE)

- AEとは, 材料に局所的な変形や割れの進展が生じた際, 放出される弾性波である
- 受動的な聴診器診断法であるため, 実機操業中の環境ノイズ信号も取得する
- AE振幅分布はフラクタルとしてのべき乗則分布を示し, 電氣的, 機械的及び流體的ノイズが正規分布を示すのとは対照的である



AEの発生,計測基本図

# AEとその振幅のフラクタル性

## □ アコースティック・エミッション (AE)

### ○ 金属材料のAE源:

- 転位の運動にともなう塑性変形
- 応力下での微視的き裂の発生・成長.

## □ AE振幅分布のフラクタル性

### ○ AEのフラクタル性: AE振幅のヒストグラムが自己相似なべき乗則で表せること

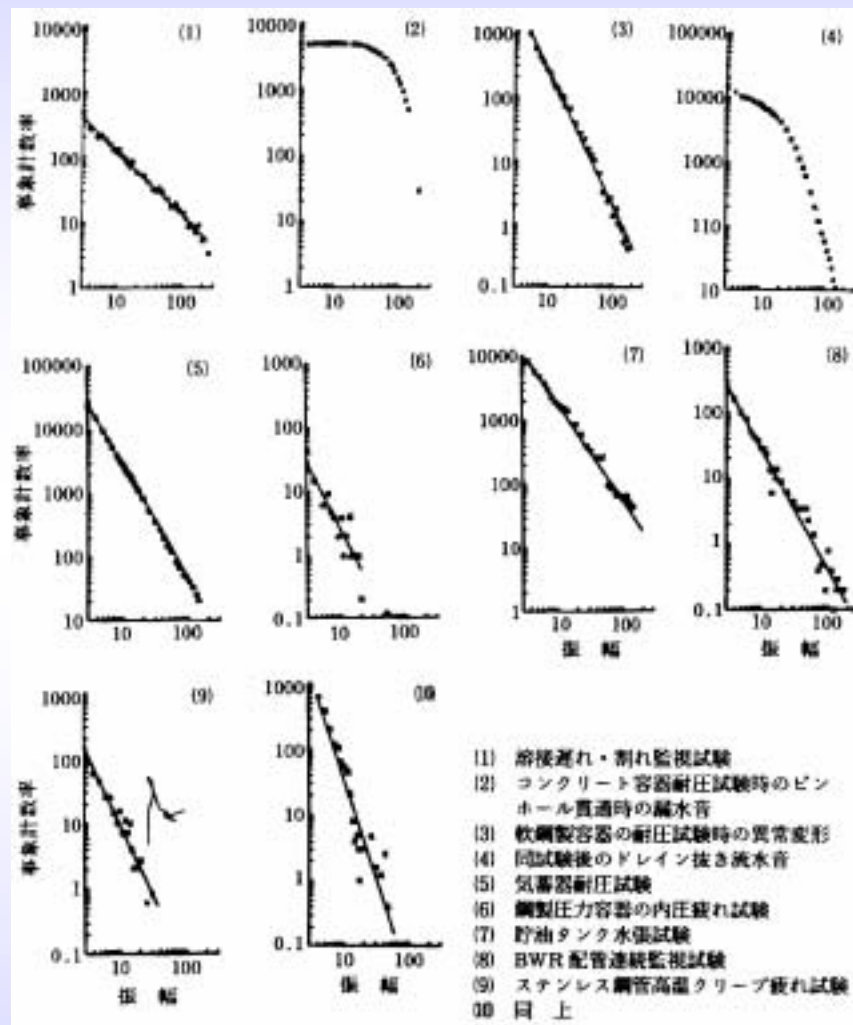
- $f(A) = cA^{-m}$

- 両対数表示:  $\log_{10} f(A) = -m \cdot \log_{10} A + \text{const.}$

### ○ フラクタル次元 $m$ ;

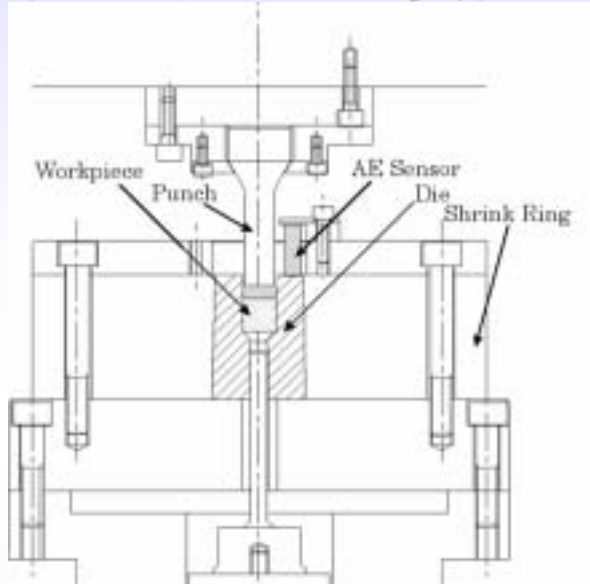
- $m > 2$ : 変形起因
- $m < 2$ : 破壊起因

# □各事例におけるAE振幅分布ヒストグラム（両対数表示）

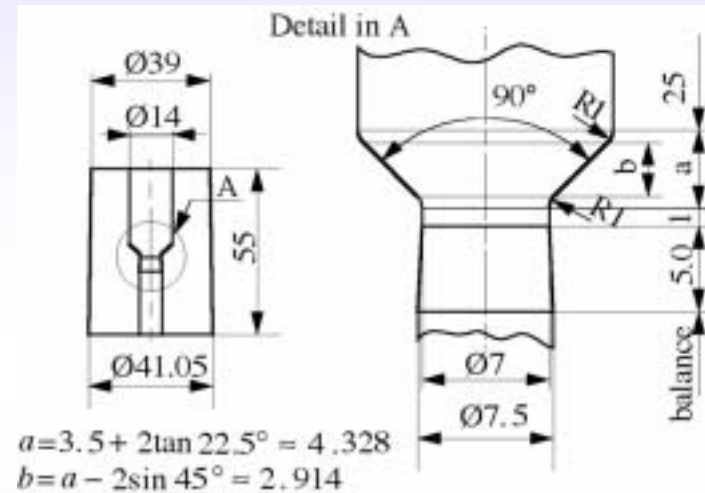


# AEのフラクタル性による繰返し冷間前方押し出し工具の損傷・破壊の検出

## □冷間前方押し出し装置および金型詳細



Apparatus and sensor place

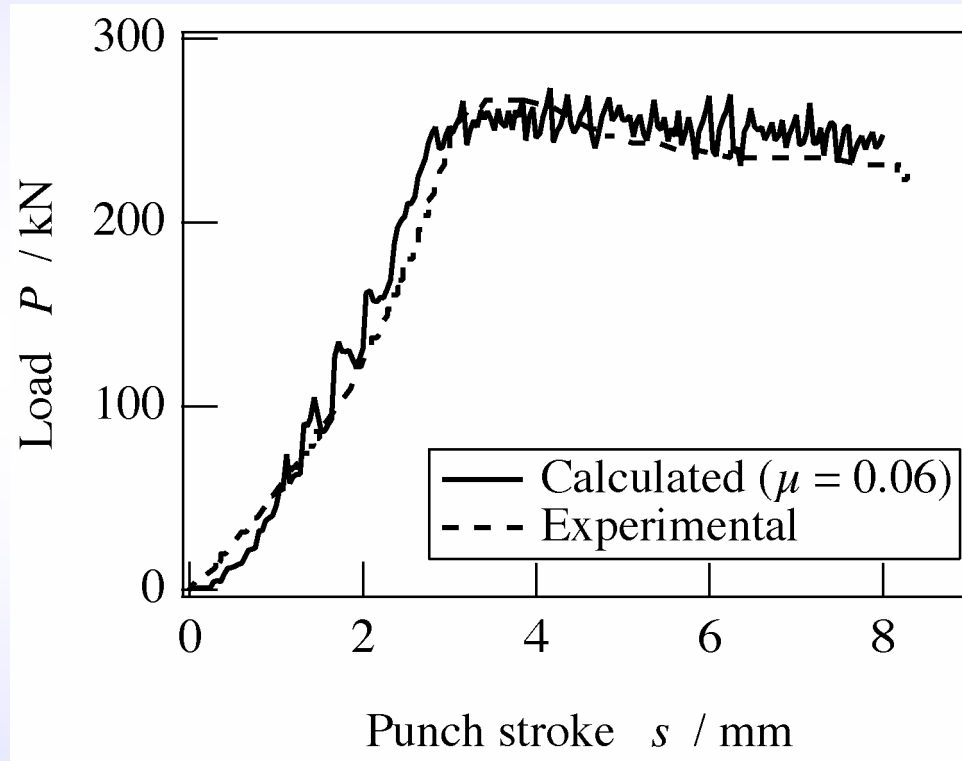


Dimension of die

- 工具材料: 冷間工具鋼 **SKD11 (in JIS)**
- 被加工材: **S25C (in JIS)**, 円柱形  $\text{Ø}14\text{mm} \times 15\text{mm}$ .
- 潤滑: **リン酸亜鉛化成処理 (低摩擦条件)**

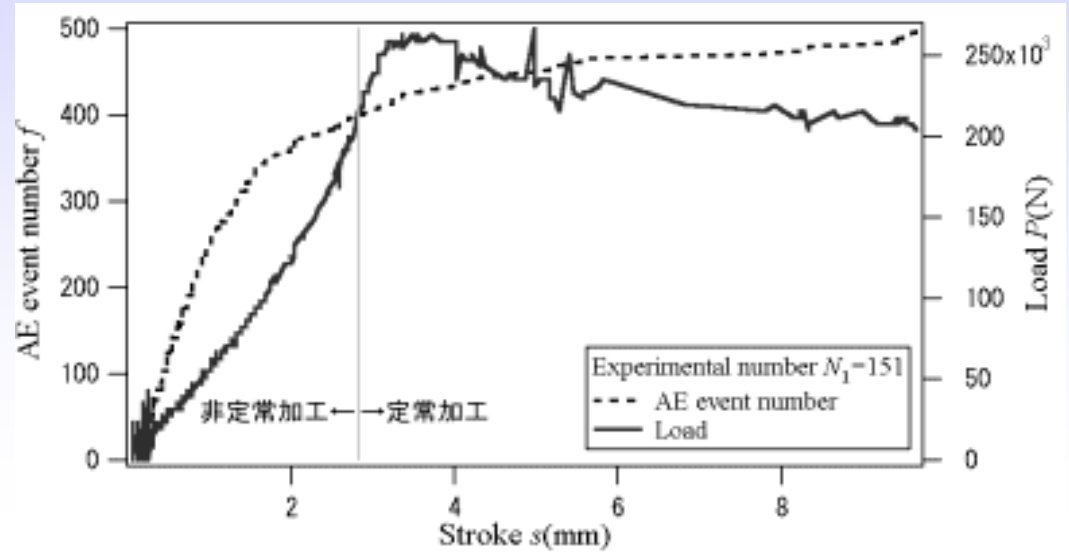
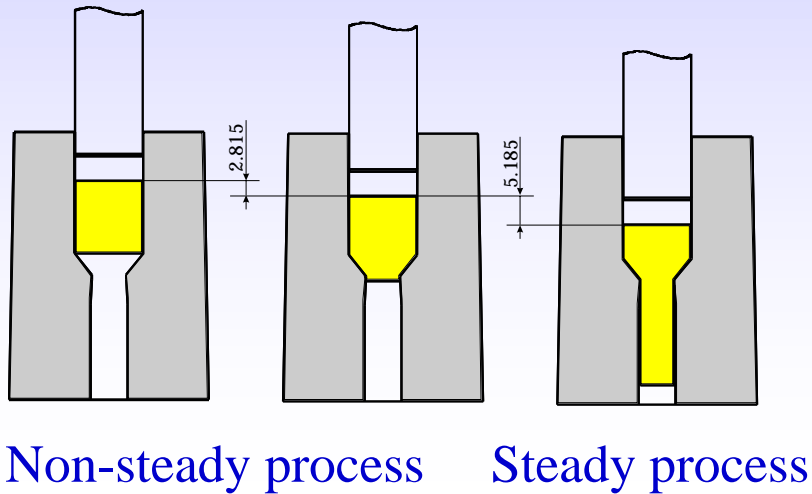
## □ 低摩擦条件における摩擦係数の同定

- 摩擦係数 $\mu$ を仮定して実験と同条件のFEMを行うことにより同定



○ Friction coefficient:  $\mu = 0.06$

## □ 押出し過程とAE発生

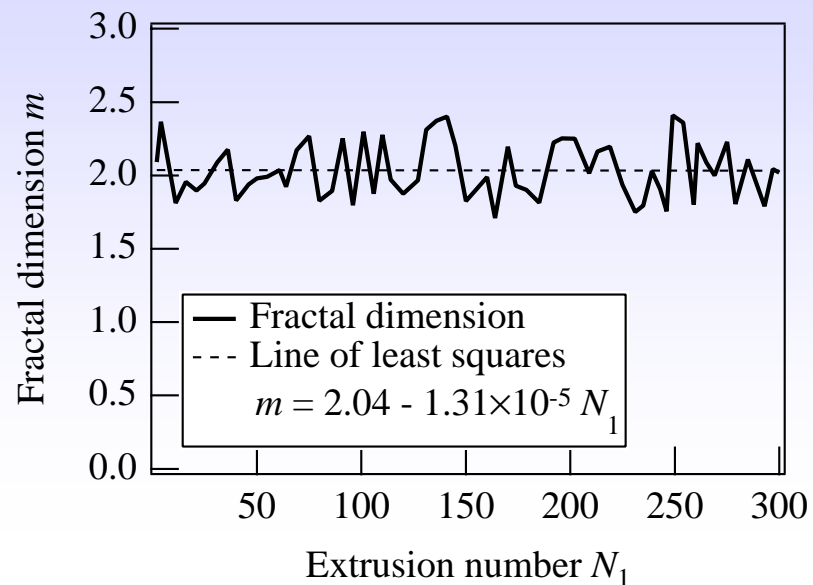


AE number, Punch load vs punch stroke

- 多数のAEが **non-steady process** で発生。
- 金型からのAEがパンチ荷重の増加によって発生



## □フラクタル次元の変化 (低摩擦条件)



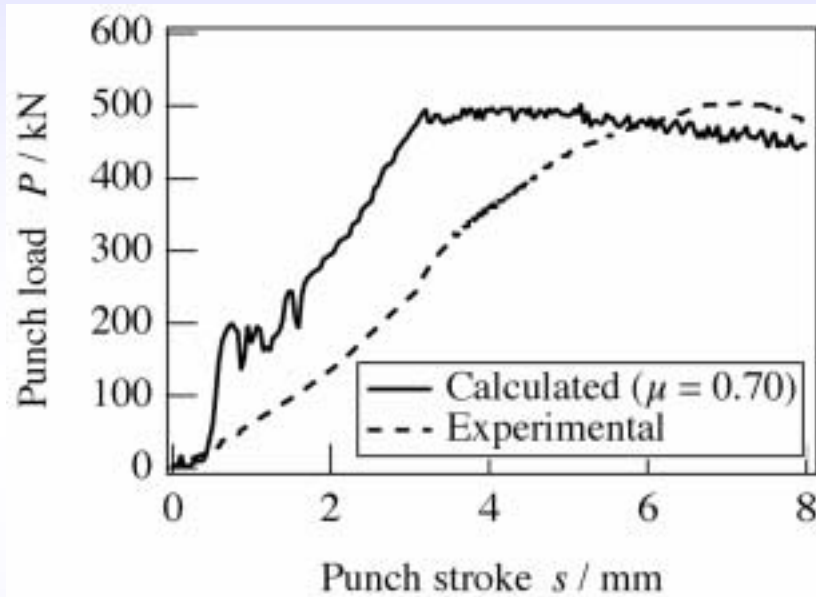
Aspect of die surface

Fractal dimension - Extrusion number

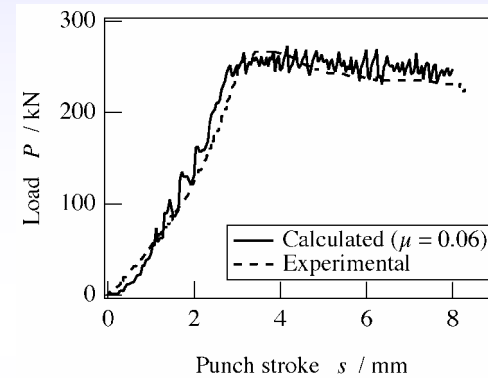
- 金型表面に欠陥は見られなかった.
- フラクタル次元  $m$ :
  - 平均: **2.04**
  - 標準偏差: **0.19**
- 低摩擦条件では, フラクタル次元に変化は見られなかった.

# 高摩擦条件による繰返し冷間前方押し出し

## 摩擦条件の見積り



Punch load - punch stroke relation



Load - stroke relation under low friction condition (for reference)

- 潤滑剤: 鉱物油とステアリン酸の混合物
- パンチ荷重は増加する一方である:  
原因: 金型と被加工材の焼付き
- 見積もられた摩擦係数:  $\mu = 0.7$

## □被加工材と金型の観察

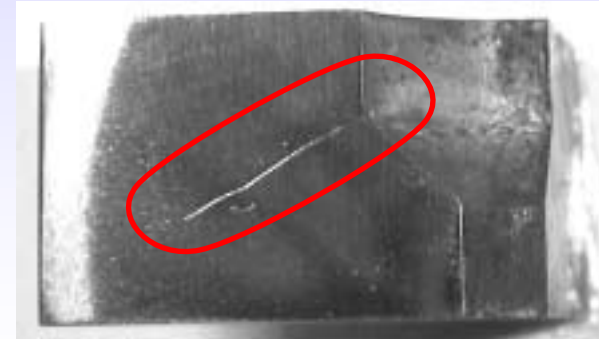


( $N_2=100$ )



( $N_2=101$ )

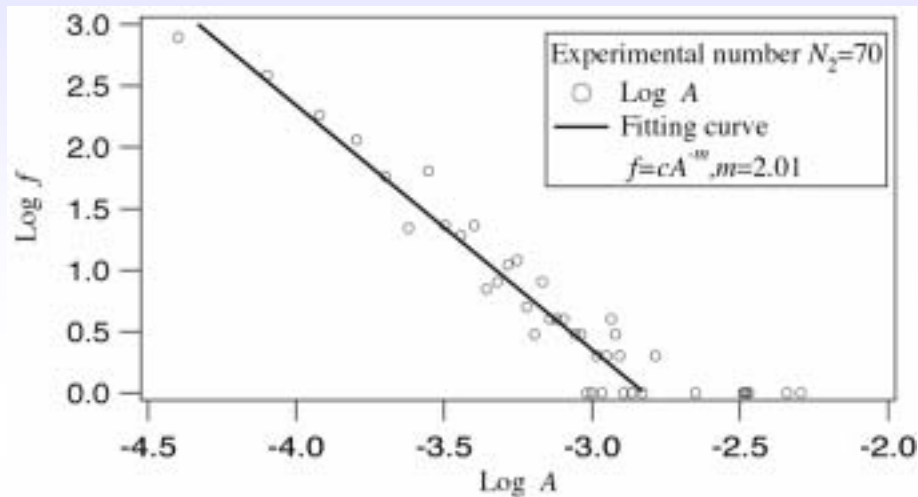
Aspect of surface of workpiece extruded



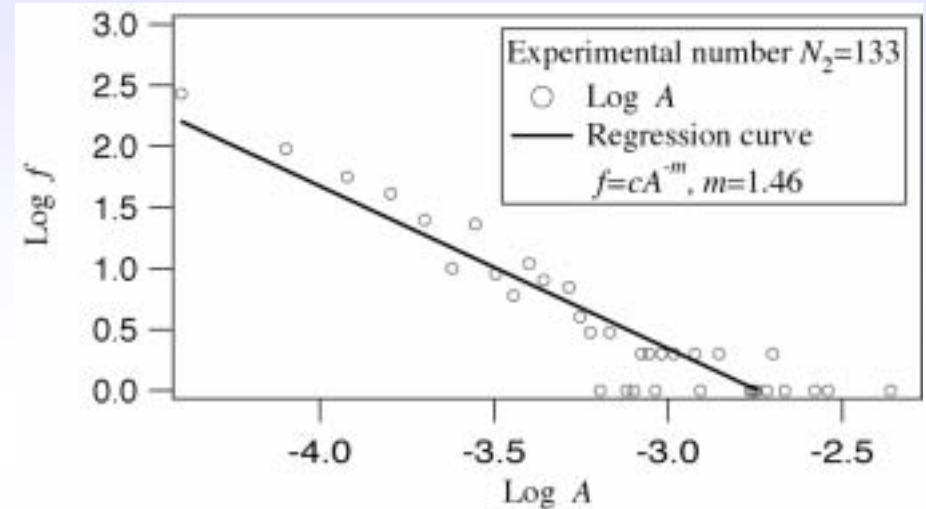
Crack of die ( After  $N_2=155$  )

- 押出し回数 $N_2=101$  で、被加工材の表面に欠陥が観察された.
- 金型表面の欠陥が $N_2=101$ で発生したと考えられる.
- 金型のき裂は、金型表面に垂直な方向に進展している.

## □ 欠陥発生前後のAE振幅分布の例



Before crack initiation ( $N_2=70$ )



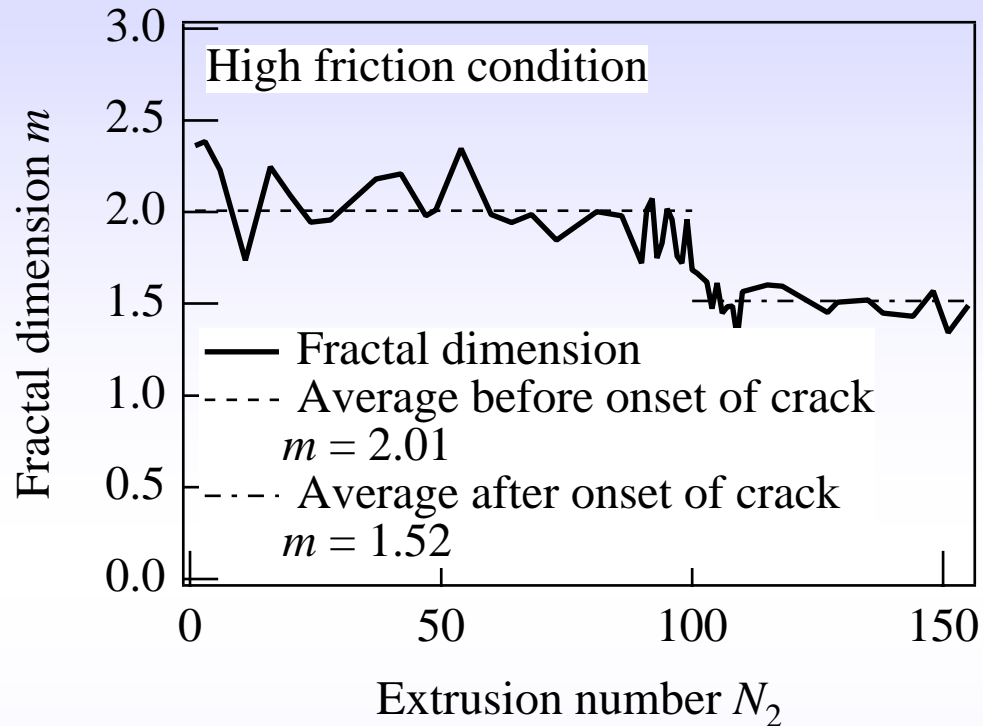
After crack initiation ( $N_2=133$ )

○ AE振幅は金型損傷の前後で、フラクタル性を示す。

○ 損傷前  $N_2=70$ :  $m=2.01$ .

○ 損傷後  $N_2=133$ :  $m=1.46$ .

## □ 高摩擦条件でのフラクタル次元の変化

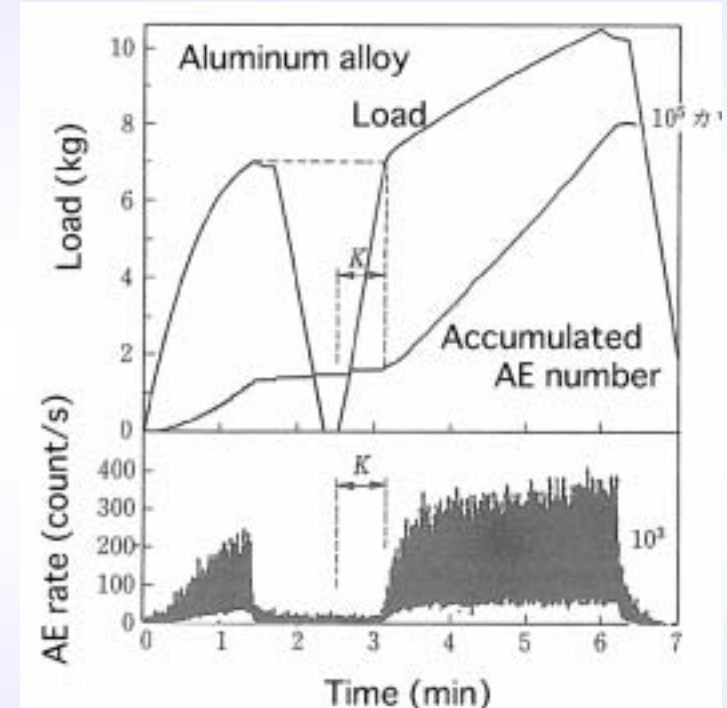


- き裂発生前のフラクタル次元の平均値:  $m=2.01$
- き裂発生後のフラクタル次元の平均値:  $m=1.52$
- フラクタル次元は冷間鍛造の工具の損傷・破壊の指標として有効である.

# Kaiser効果を用いた金型起因AEの分離手法の提案

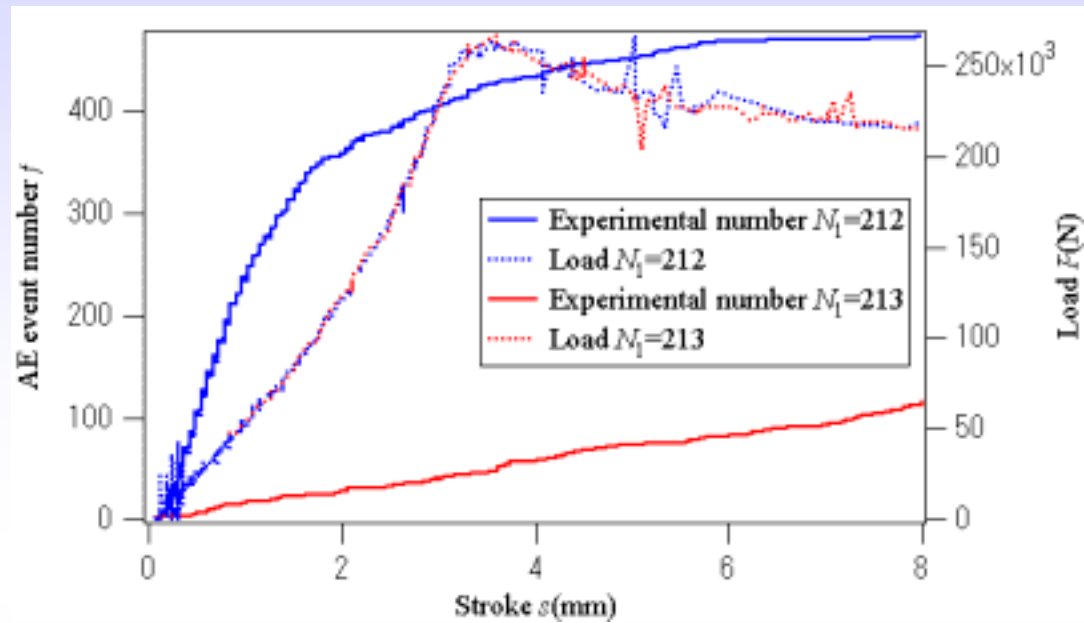
## □材料のKaiser効果

- **Kaiser effect:** 材料が先行する負荷によりAEを放出したのち除荷されたあと、再び負荷を受けるとき、先行する負荷を超えるまではAEの発生が見られない現象
- 負荷中に材料内部の構造に変化が生じるような場合（微視的破壊など）には、Kaiser効果は消失し、先行する負荷以前にAEの発生が見られる。



A example of Kaiser effect:  
Aluminum alloy

## □低摩擦条件におけるKaiser効果



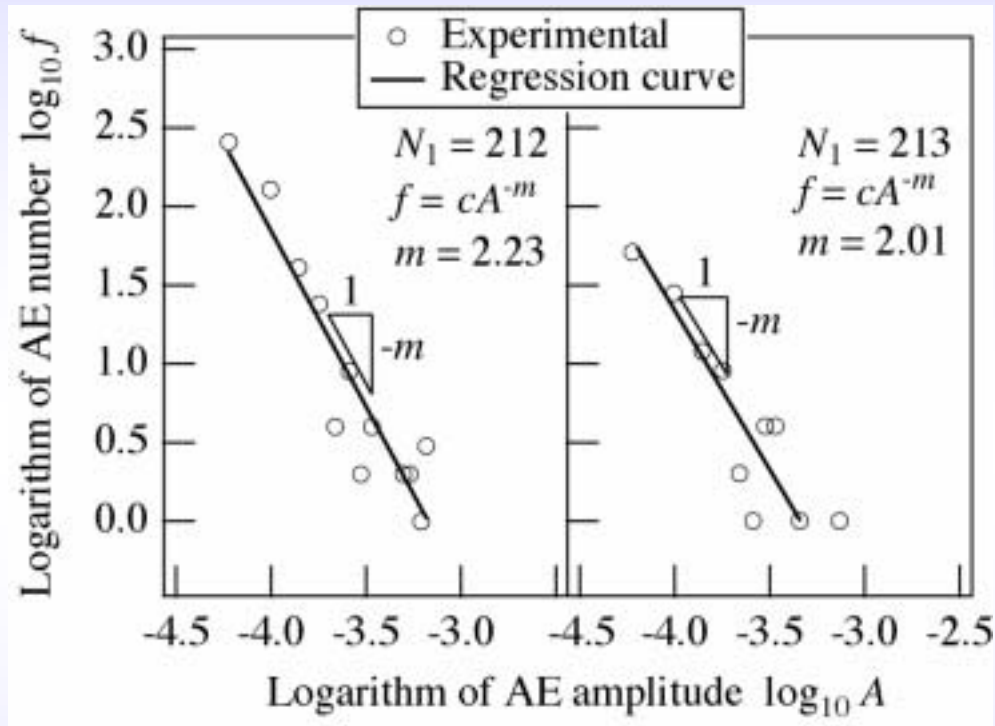
○  $N_1 = 212$  と  $N_1=213$ において：

- 負荷は同じ.
- $N_1 = 213$  のAE数は $N_1 = 212$  に比べて多い.
- $N_1 = 213$  では、金型からのAEはKaiser効果により発生せず.

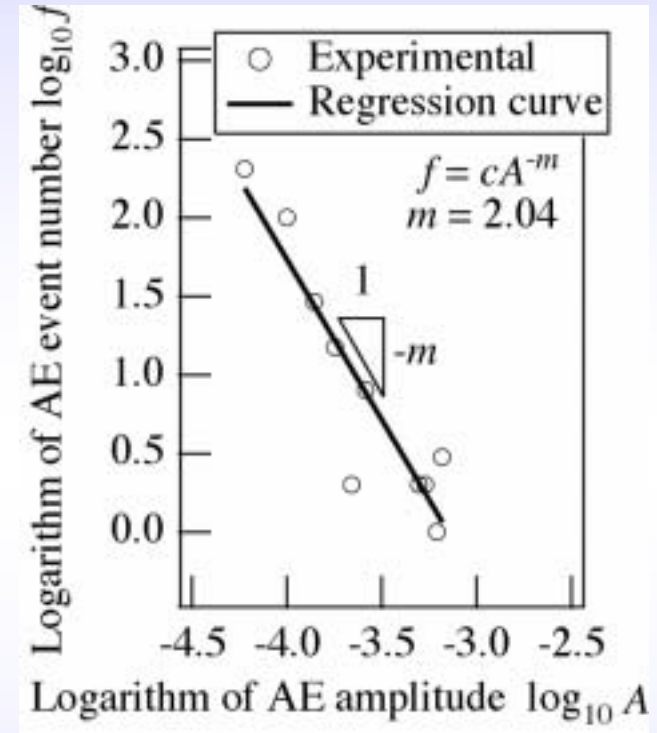
○  $N_1 = 212$  におけるAE: 金型, 被加工材, 摩擦, 雑音

○  $N_1 = 213$  におけるAE: 被加工材, 摩擦, 雑音

# □ 低摩擦条件における金型起因AEの分離

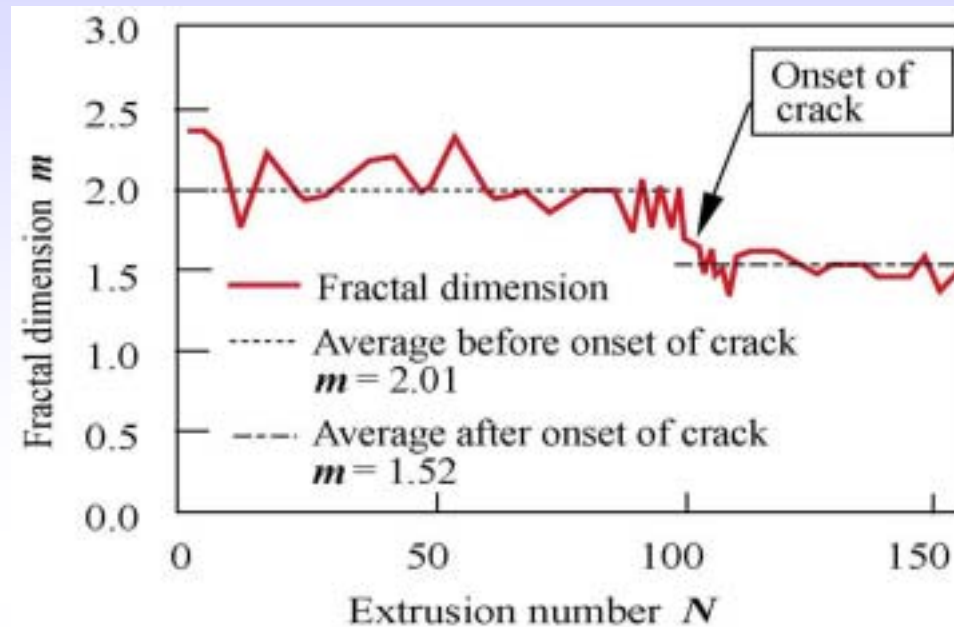


Histogram of AE with and without the Kaiser effect



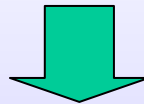
Histogram of die-originated AE





## 冷間押出しにおける金型破壊前後のフラクタル次元の変移

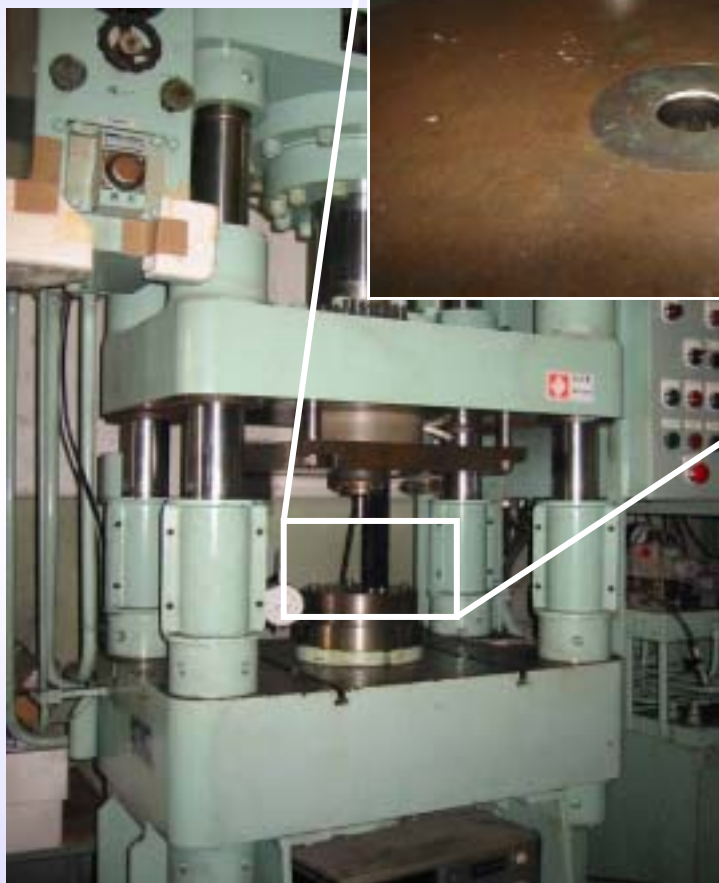
フラクタル次元は破壊損傷前で急に減少するため、この傾向を参考にした冷間鍛造用金型の破壊損傷の診断を行う



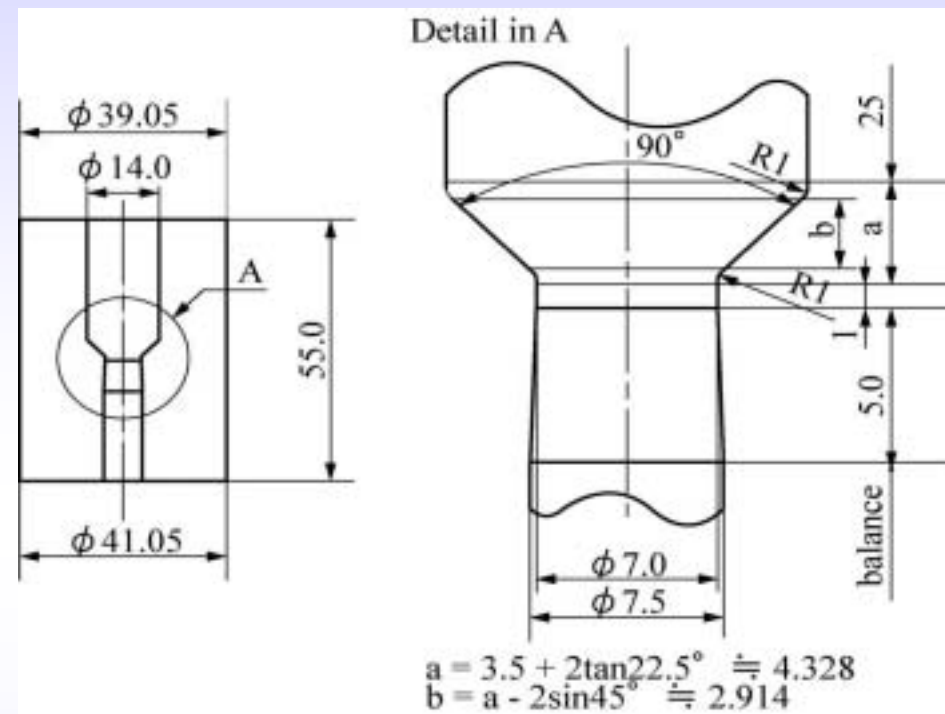
実環境では様々な加工条件が想定されるが、その条件の一つである潤滑条件について、フラクタル次元値の有用性を調べる

# AEのフラクタル特性に及ぼす潤滑条件の影響

## 実験装置



プレス機外観

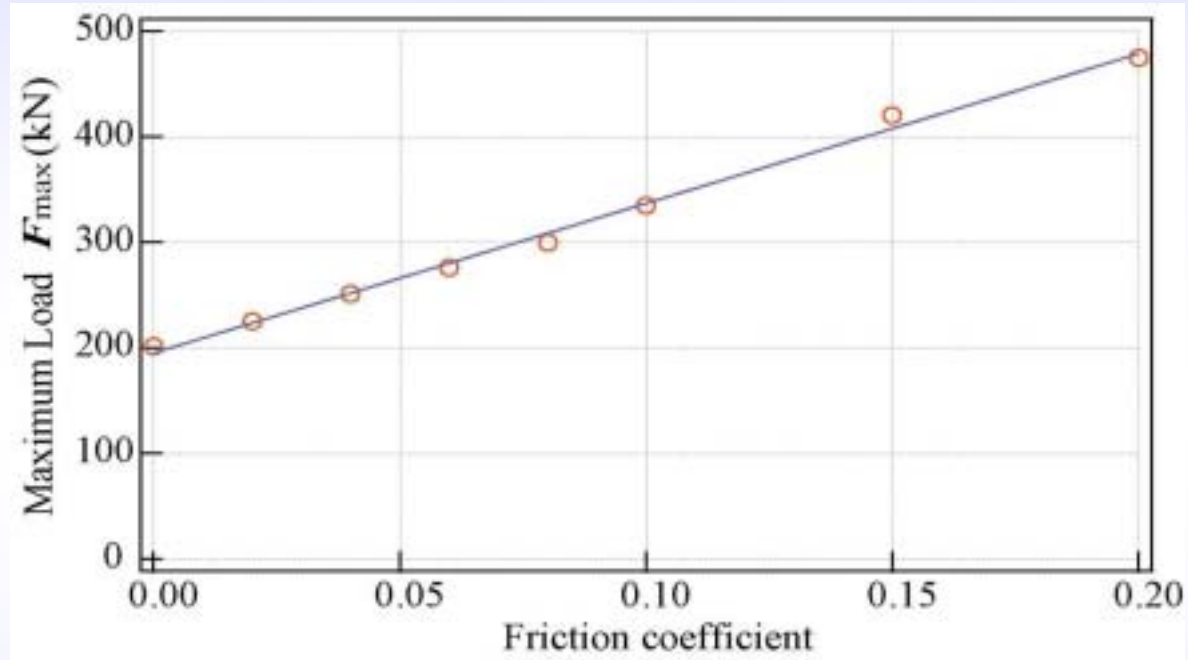


金型寸法図

ダイインサート部:SKD11  
ケース部 :SKD61

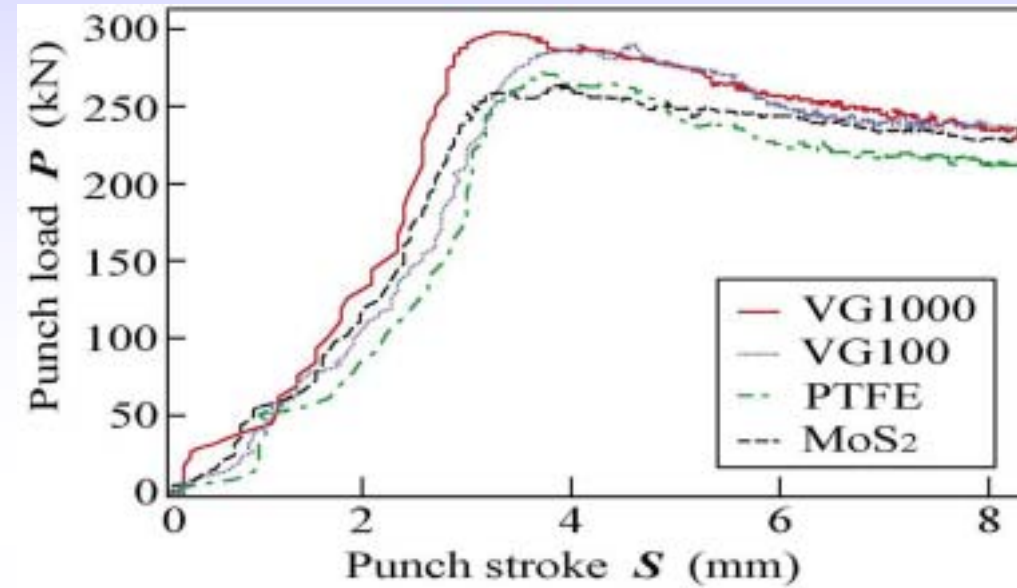
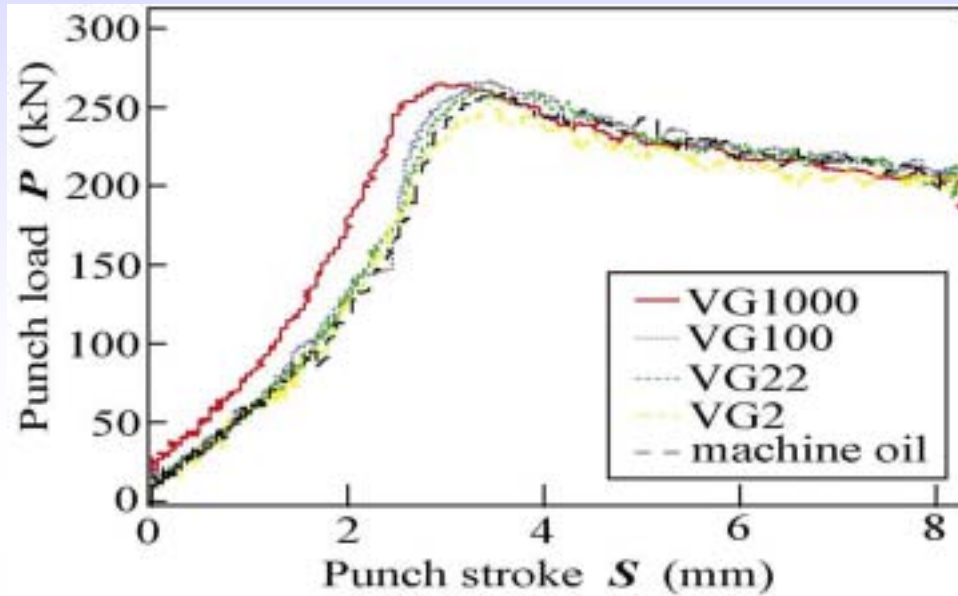
ダイス角 : $\alpha = 45^\circ$   
押し出し比 : $R = 4$

# FEMによる摩擦係数の算出



FEMより算出したCoulomb摩擦係数と最大パンチ荷重の較正曲線

# 実験結果



条件A 化成皮膜+潤滑剤

条件B 潤滑剤のみ

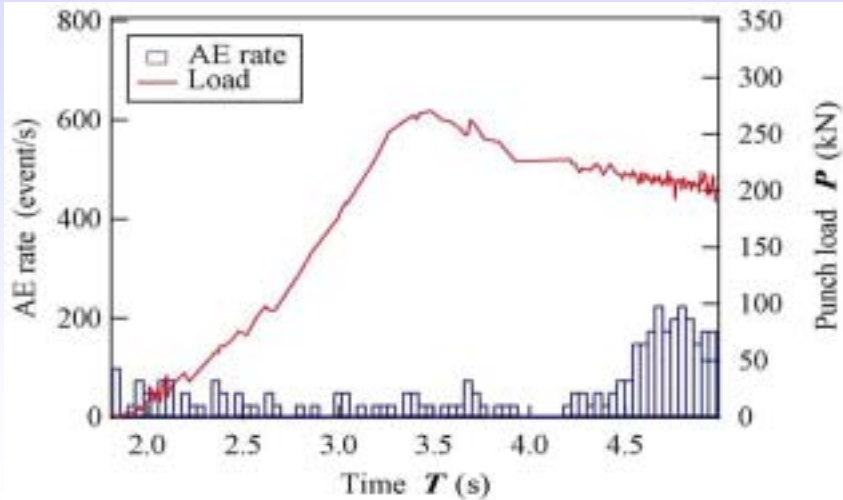
パンチ荷重-パンチストローク曲線

条件B(潤滑剤のみ)

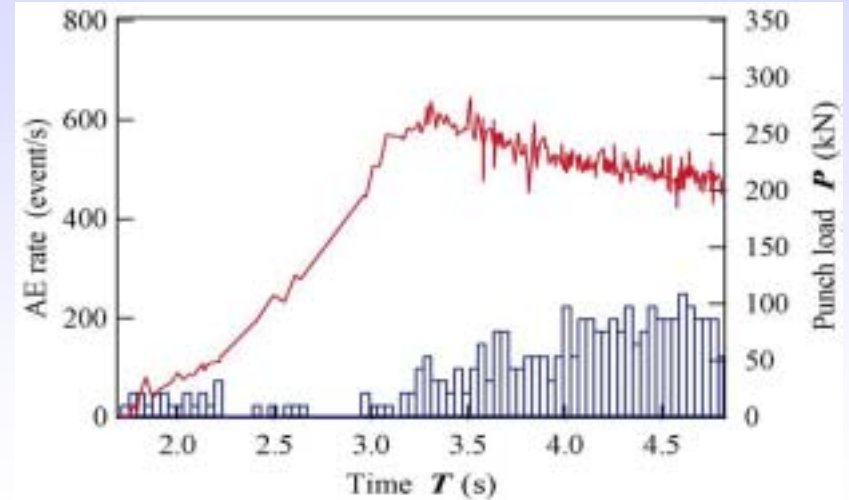
潤滑剤	VG1000	VG100	PTFE	MoS <sub>2</sub>
最大パンチ荷重 $P$ (kN)	299	284	273	263
Coulomb摩擦係数 $\mu$	0.080	0.066	0.057	0.050

$\mu=0.049$

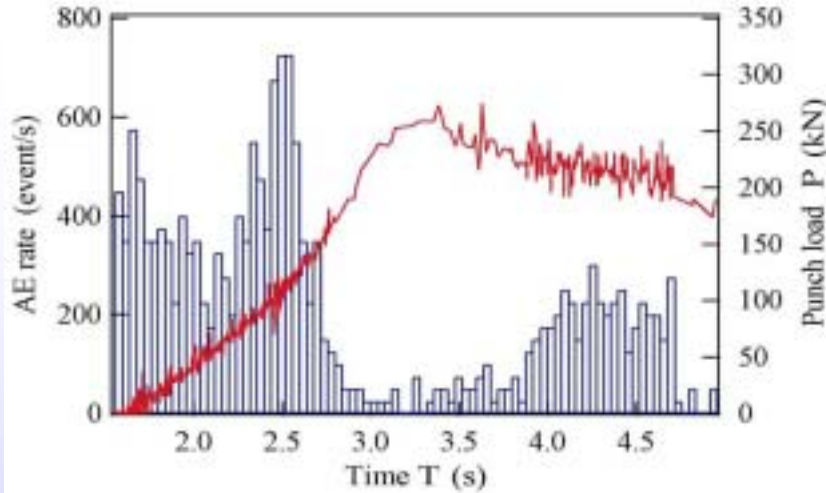
潤滑条件のAE速度に及ぼす影響(条件A)



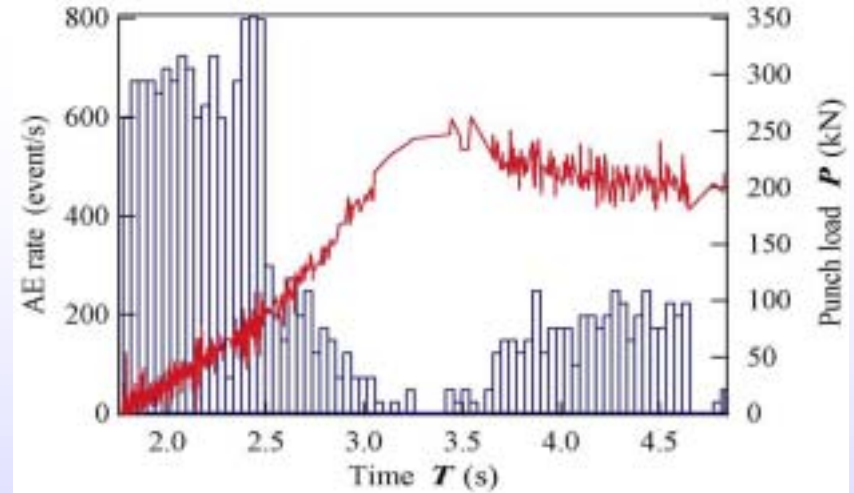
VG1000



VG100



VG22

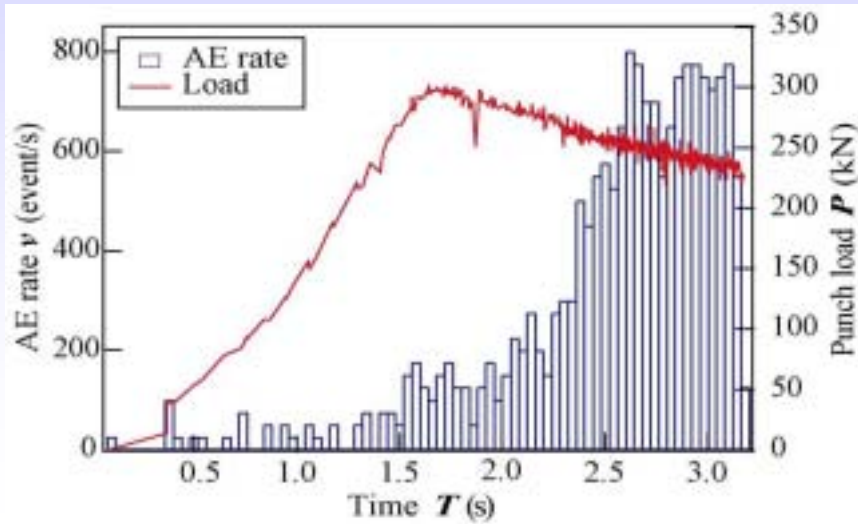


VG2

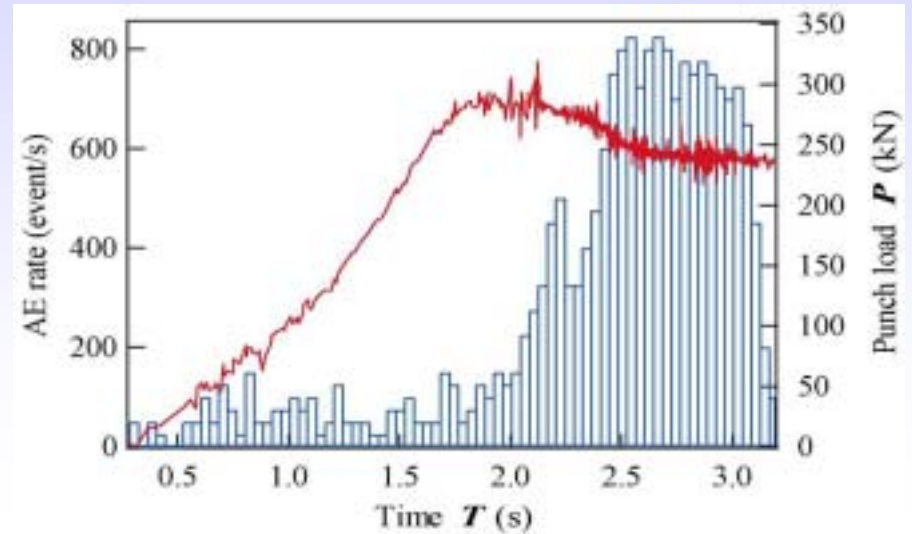
フラクタル次元  $m=2.6$  で一定



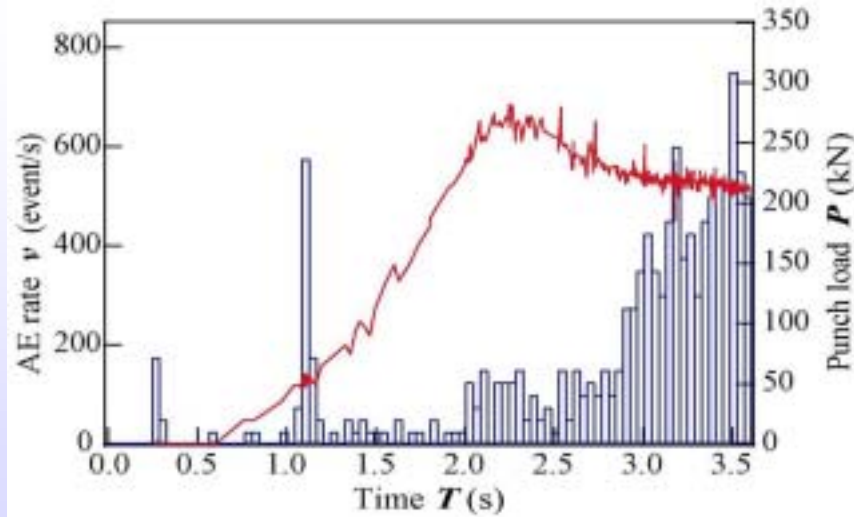
潤滑条件のAE速度に及ぼす影響(条件B)



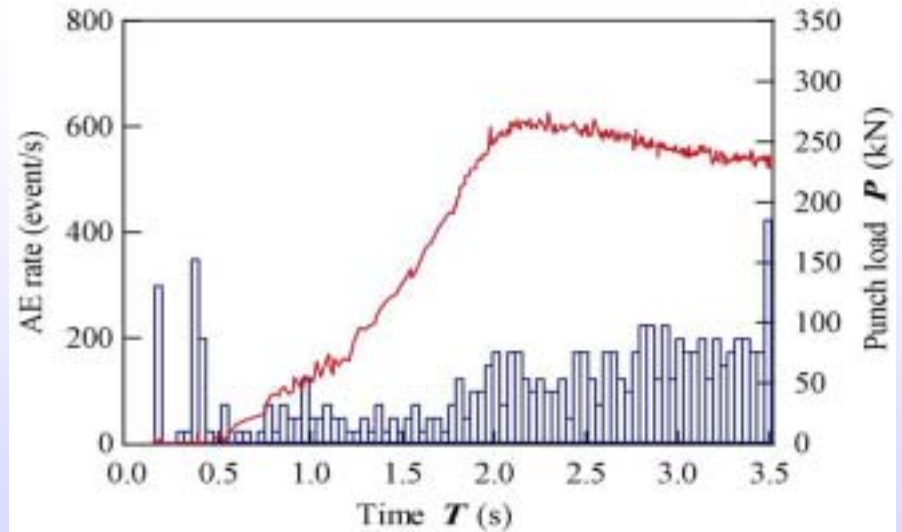
VG1000



VG100

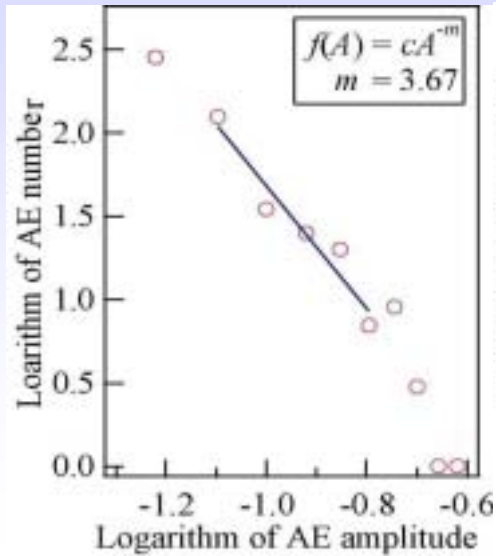


PTFE

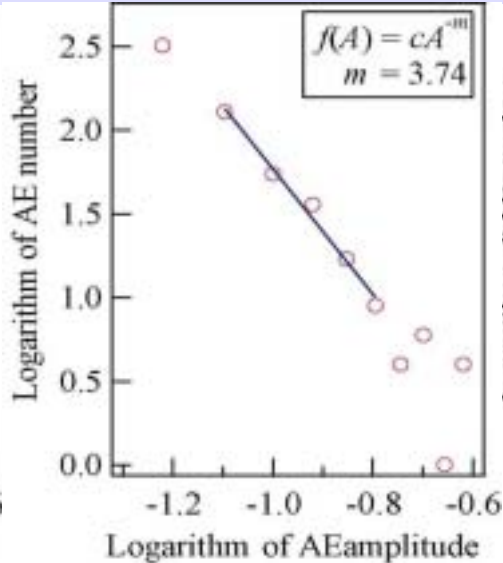


MoS<sub>2</sub>

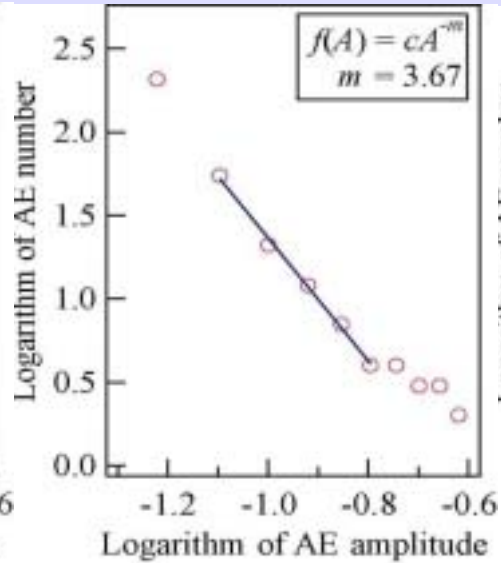
種々の潤滑条件におけるフラクタル次元(条件B)



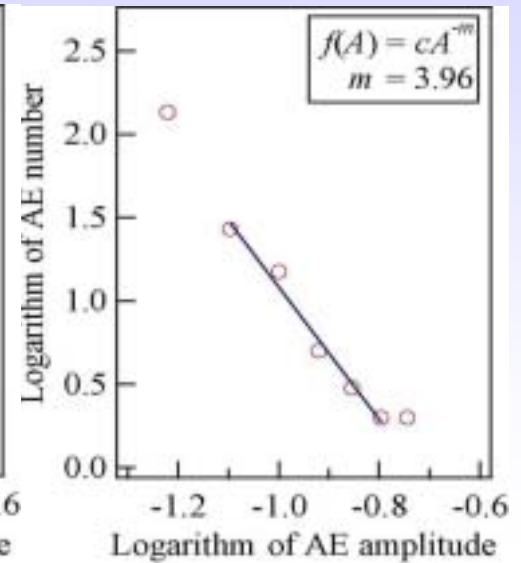
VG1000



VG100



PTFE



MoS<sub>2</sub>

各潤滑条件における結果のまとめ

潤滑剤	VG1000	VG100	PTFE	MoS <sub>2</sub>
最大パンチ荷重 $P$ (kN)	299	284	273	263
Coulomb摩擦係数 $\mu$	0.080	0.066	0.057	0.050
AE平均事象エネルギー $\bar{E}$	0.00627	0.075059	0.005638	0.005318
フラクタル次元(条件B) $m$	3.67	3.74	3.67	3.96

# まとめ

- AEのフラクタル特性を利用した冷間鍛造工具の損傷・破壊予知技術の可能性を確認した。
- AEのフラクタル特性は、潤滑条件に拘わらず、変形起因および破壊起因の特徴を有することが明らかになった。