

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560718

研究課題名（和文）AEによる冷間鍛造工具の損傷・破壊予知技術の開発

研究課題名（英文）Prediction Technique of damage and fracture of cold forging tools by Acoustic Emission

研究代表者

早川 邦夫 (HAYAKAWA KUNIO)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：80283399

研究成果の概要（和文）：本研究では、冷間工具材料の損傷・破壊や被膜工具の被膜はく離挙動の検出を AE 振幅のフラクタル次元を用いて解明するための技術開発を行った。その結果として、実生産現場における長時間生産時の工具損傷状態をモニタリングできる AE 取得およびフラクタル次元解析プログラムを作成した。それらを用いた実生産時のフラクタル次元を元に、より精密な破損予測のためのデータ処理方法を提案できた。

研究成果の概要（英文）：Technique for detection of damage to and fracture of cold forging tools during forging process by AE technology is developed in the present study. The fractal property of AE amplitude is employed for detecting the damage and fracture of tools. Computer programs for acquisition of AE and continuously and simultaneously calculation of the fractal dimension of acquired AE amplitude are first developed. Then, a proper data processing method for more precise prediction of fracture of tools is proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：塑性加工

## 1. 研究開始当初の背景

ボルトや小型の鍛造品を大量に製造する技術はいまや日本のものづくりを支える上で欠かせないものである。しかし、この冷間鍛造工程では、しばしば予測不能な工具破壊が生じ、作業の中断や破断工具により大量に生産されてしまう不良品が問題となっている。現在鍛造機械に装備されている異常検知・停止装置はあるものの、その作動時にはすでに工具は破壊しており、その装置で工具の破壊を予知することはできない。そのため、生産現場では常に工具破壊の予知システムについてのニーズが絶えない。

研究代表者らは、このようなニーズに対してアコースティック・エミッション(AE)を利用した冷間鍛造工具の破壊予知技術について調査・研究および実験を行ってきた。

AE 振幅分布には、フラクタル特性があることが明らかになっている。すなわち、AE 振幅  $A$  の頻度分布は、比較的広い範囲の振幅域において次式のように表される。

$$f(A) = cA^{-m} \quad (1)$$

ここで、 $c$  は測定条件ごとに決定される係数である。式(1)の対数表示は次式のようになる。

$$\log_{10} f(A) = -m \log_{10} A + \log_{10} c \quad (2)$$

すなわち、フラクタル性を有する場合、両対数表示の下でその分布は  $-m$  の勾配を持つ直線形状となる。

式(1)における指数  $m$  は、フラクタル次元と呼ばれる。 $m$  の値を調べることにより、変形に起因する AE と破壊に起因する AE とを判別でき、AE 活動度の定量的な評価に有効である。通常  $m$  が大きい場合 ( $m > 2$  程度) は健全であり、 $m$  が減少傾向でなおかつ  $m < 1$  となるような状況は、何らかの破壊現象が生じているものと考えられる。この現象を用いて、工具の残存寿命の減少に従い徐々に小さくなることを確かめてきた。

## 2. 研究の目的

本手法を、実生産現場に適用するためには、大量生産に適した自動モニタリングシステムが必要となる。同時に、信頼性の向上が必須となる。そこで、本研究では、以下の3つを研究目的とする。

1) 工具の破壊を正確に予知できる破壊予知パラメーターに関する研究：

工具の破壊の予兆を的確にとらえるためには、得られる AE フラクタル次元値を統計的に適切に処理し、信頼性の高い破壊予知のためのパラメーターを特定する必要がある。そのため、実験によるデータを基にした品質

工学的統計的手法による信頼性の高い破壊予知パラメーターを開発する。

2) AE フラクタル特性と工具材料損傷発展の関連の解明：

AE のフラクタル特性は、種々の振幅分布を有する AE 波が多く AE 源から放出されることにより現れるとされている。AE の放出は、材料の内部損傷過程と大いに関連がある。しかし、この関連を工具材料の損傷に対して調べた例はほとんどない。そこで、実験的ならびに解析的手法を用いて AE フラクタル特性と材料損傷の関係を明らかにする。そのことにより、工具破壊予知技術の信頼性の向上を目指す。

3) 工具破壊予知・警告・鍛造機械停止システムのプロトタイプの開発：

鍛造機械製造メーカーおよび鍛造部品製造工場と協力し、工具破壊予知・警告ならびに鍛造機械停止システムのプロトタイプを開発する。

## 3. 研究の方法

1) 工具の破壊を正確に予知できる破壊予知パラメーターに関する研究

地元企業と協力して、実際の鍛造機を用いて以下のように工具の AE 信号を取得する。

A) 工具破壊の生じない場合の AE 信号とフラクタル特性の取得：破壊のない場合、フラクタル特性の変化はない。基準となる状態を明らかにする。

B) 工具破壊の生じる設計を行った工具による AE 信号のフラクタル特性の取得：過大な負荷のかかる設計を行った工具で、破壊へといたる AE 信号を取得し、その特徴を明らかにする。

C) 取得したフラクタル特性による高精度な破壊予知パラメーターの解明：フラクタル次元値の大きさ、ばらつきの程度に応じて、平均、標準偏差、歪度や尖度などの高次統計量などを種々組み合わせる。

実験方針を申請者が立案し、データ処理およびその検討を大学院生が担当する。また、地元企業の連携研究者 久保田義弘氏を通じて、企業の技術者と協働する。

2) AE フラクタル特性と工具材料損傷発展の関連の解明

これまでに申請者が提案している、工具材料の損傷発展と、顕著な引張り強度と圧縮強度の差違を表現できる構成式による有限要素解析と AE フラクタル次元の変化の関係を見出す。そのための基礎的データ取得のため、大学所有の引張り試験機により、工具材料の試験を行う。

さらに大学所有の機器を用いた工具材料損傷部位の微視的観察により、工具材料の損傷程度と AE フラクタル次元の関係を明らかにする。

3) 工具破壊予知・警告・鍛造機械停止システムのプロトタイプの開発

AE フラクタル特性による工具損傷・破壊システムの実生産現場への適用をめざし、AE 自動取得、フラクタル次元自動計算、自動描画ならびに警告および自動停止を実現するシステムのプロトタイプを作成し、その妥当性を検討する。

#### 4. 研究成果

1) 工具の破壊を正確に予知できる破壊予知パラメーターに関する研究

AE のフラクタル次元は材料の健全な変形と損傷破壊を区別できる特徴を持つが、その値は、ばらつきがある。そのばらつきの中から破壊に直結するようなパラメーターを用いる必要がある。そこで、本研究では、実鍛造現場におけるデータ取得とその解析を通じて、工具破壊を精度よく予測可能なパラメーターの探索を行った。

使用したパーツフォーマーは中島田鉄工所製 PF-860 2-Die 3-Blow 方式である。

AE 計測システムは、エヌエフ回路設計ブロック製 AE 計測システム MUSIC を用いた。このシステムは、AE センサー、プリアンプ 9917、ローカルプロセッサ 9602 からなる。AE センサーとして、共振周波数 140kHz を持つ高感度共振型センサー（エヌエフ回路ブロック製 AE901U）を用いた。AE センサーをバックプレート上で測定対象の金型に最も近い位置に設置した。設置には簡便なマグネットホルダーを利用した。

実験は、パーツフォーマーによる夜間連続操業に対して行った。担当者の帰宅前にパンチの交換を行った。本実験では、作成したデータ取得プログラムの信頼性を確認するため夜間操業中連続してデータを取得し続けた。その後、フラクタル次元  $m$  を測定した。 $m$  の算出は、AE 振幅値（増幅後） $0.3V$  ( $\log_{10} A = -0.52$ ) 以上、 $1.5V$  ( $\log_{10} A = -0.18$ ) までの範囲で計算した。また、部品を 5 個製造するごとに 1 つの  $m$  を計算した。

図 1 は、計測対象とした鍛造金型の寸法図である。

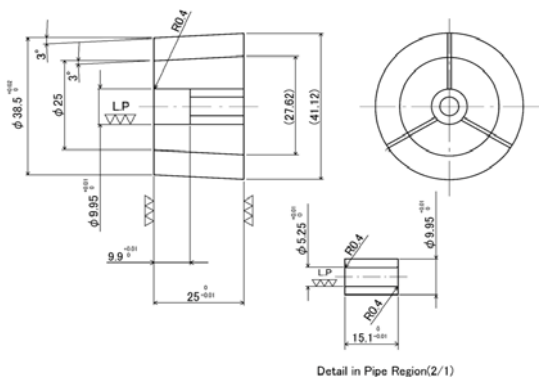


図 1 計測対象金型

図 2 は、連続操業中の  $m$  の変化を示す。ただし、機械調整など明確な操業停止時の  $m$  は除いてある。図を見ると  $N=30000$  付近から非常に小さな  $m$  が測定されている。この付近で担当者が帰宅前にパンチを交換したことがわかっている。パンチの交換により何らかの不具合が発生し、それが小さな  $m$  の発生の原因と考えられる。その後、 $N=56500$  付近以降小さな  $m$  は減少している。この時点で計測対象金型の交換が行われた。そのため、金型破損現象を示す小さな  $m$  の発生がなくなったと考えられる。

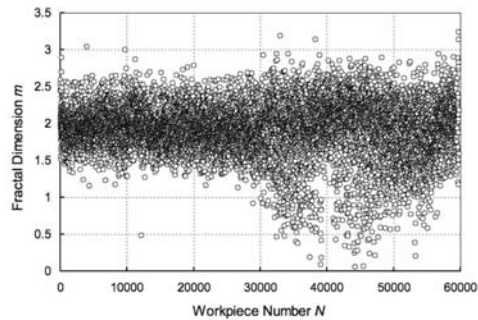


図 2 フラクタル次元の変化

フラクタル次元のすべてのデータから、破壊に直結するようなパラメーターを算出することを試みた。

しかし、 $m = 1.5 \sim 2.5$  のデータが圧倒的多数であり、統計的なモーメント量（期待値、2乗平均、歪度、尖度など）は、図○の  $N = 30000 \sim 55000$  付近の変化を曖昧にすることがわかった。

そこで、より直接的に  $m < m_{cr}$  である  $m$  の個数を数えることを提案した。図 3 は、 $m_{cr} = 1.0$  としたときの  $m$  の変化を示す。絶対値は少ないものの、 $N = 30000$  以降の変化を適切に示すことができる。また、この変化を微分した（いわゆる速度）についてもより精度の高い破壊予測が可能であることを示した。

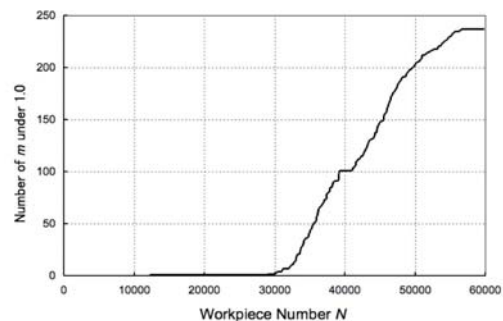


図 3  $m < m_{cr}$  の変化

2) AE フラクタル特性と工具材料損傷発展の関連の解明

工具材料の引張試験とそのときに発生す

る AE およびそのフラクタル次元を調べた。試験には島津製作所製 AG-100 kND を用いた。ロードセルの定格容量は 100kN である。また、試験条件は、引張り荷重速度 100kN/min である。

AE 計測システムは、エヌエフ回路設計ブロック製 MUSIC システムを用いた。AE センサーは広帯域型であり、150kHz から 1200kHz までほぼ一定の周波数特性を示す。また、AE 計測条件は、フラクタル解析においてアンプ系総利得 70dB、しきい値 140mV、周波数解析においてサンプリング周波数 500kHz、サンプリング件数 106 件である。

試験片の材料には、押出し試験で用いた金型材料と同じ SKD11 を用いた。また、破断位置を限定するため、図 4 のような切欠き試験片を用いた。

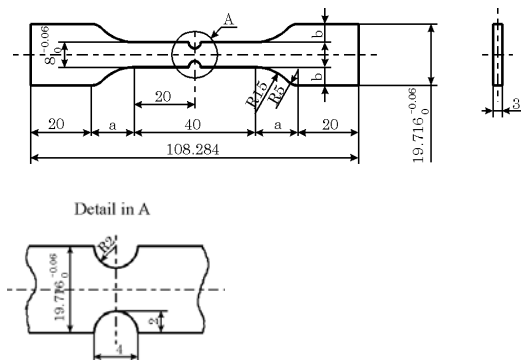


図 4 引張試験片形状

材料破断発生時の AE 振幅分布の一例を図 5 に示す。このときの  $m$  は 1.33 であった。これらの AE データには、破断に至らない状態におけるものも含まれていると考えられるので、破断そのものを示す  $m$  はさらに小さい

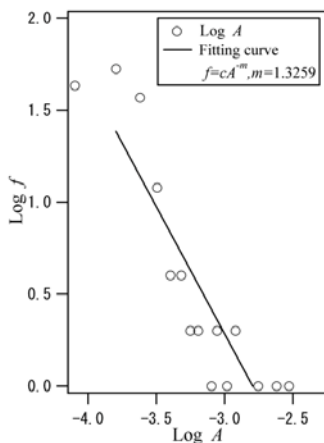


図 5 材料破断時のフラクタル次元

ものと考えられる。前出の 1) において提案したように、 $m < 1.0$  という規準は、工具材料破壊に対してほぼ妥当と判断できる。

3) 工具破壊予知・警告・鍛造機械停止システムのプロトタイプの開発

AE の振幅分布の自動取得および振幅フラクタル次元を自動計算するプログラムのプロトタイプを開発した。

AE 計測システムは、エヌエフ回路設計ブロック製 AE 計測システム MUSIC を用いた。このシステムは、AE センサー、プリアンプ 9917、ローカルプロセッサ 9602 からなる。AE センサーとして、共振周波数 140kHz を持つ高感度共振型センサー(エヌエフ回路ブロック製 AE901U)を用いた。

作業中のリアルタイム検出のため、AE 振幅をローカルプロセッサから取得するプログラムを Microsoft Visual Basic 2003 で作成した。図 6 は、作成プログラムの画面を示す。ローカルプロセッサの装備している AE アンプ分 (2 台) のデータを取得するプログラムである。



図 6 AE 取得プログラム

また、取得した AE データから即時的にフラクタル次元を計算しグラフ化するプログラムを Microsoft Excel 上で動作する Visual Basic Application (VBA) でそれぞれ作成した。図 7 は、作成したプログラムを稼働させているエクセルの画面を示す。計算されたフラクタル次元とそのグラフと、AE エネルギー  $E$  についても同時に計算、グラフ描画を行う。ここで AE エネルギー  $E$  とは、取得した AE 振幅値の自乗を総和した量である。

これらのプログラムは、上述の実鍛造部品製造プロセスに適用された。不安定な挙動を示すことなく、データの取得とフラクタル次元の計算およびグラフ描画を継続した。継続時間は最長約 9 時間、取得データ数および計算回数は約 60000 であり、実用上問題のない安定性を示した。

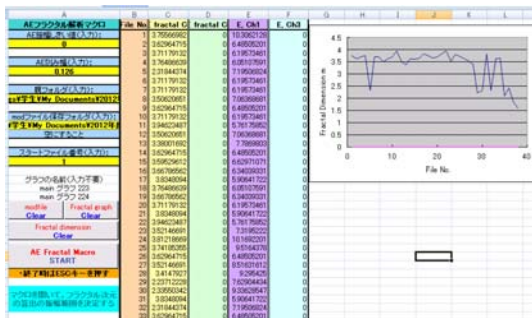


図7 フラクタル次元自動算出プログラム

これらのプログラムをより使いやすく統合し、さらに、1)で提案された破壊規準とその表示ができるように改良することで、実生産現場において利用可能になるものと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

①早川邦夫, スクラッチ試験の3次元有限要素解析, CSM Instruments ユーザーミーティング, 2013年1月28日(神奈川県)

②早川邦夫, 冷間鍛造金型の損傷解明に関する解析的・実験的手法, 日本塑性加工学会鍛造分科会研究集会, 2011年6月14日(群馬県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早川 邦夫 (HAYAKAWA KUNIO)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号: 80283399

### (2) 研究分担者

なし

研究者番号:

### (3) 連携研究者

久保田 義弘 (KUBOTA YOSHIHIRO)

静岡大学・工学部・産学連携研究員

研究者番号: