

# プレス金型の故障診断手法の確立（第3報）

— AEセンシングデータ解析 —

横山 貴広、松原 早苗

The establishment of failure diagnosis system for die (III)

- AE sensing data analysis -

Takahiro Yokoyama and Sanae Matsubara

金型はプレス機の内部に存在しているため、プレス加工の際に目視でその状態が確認できず、また任意に同じ故障を再現することができないため、早期の故障発見が難しい問題を抱えている。当研究所では、自動車・航空機産業を支える県内の機械・金属部品製造業の支援を目的に、金型故障を早期に発見して故障診断をするシステムの研究開発を継続している。昨年度は深絞り試験機で金型故障を任意に再現できる金型の設計・製作を実施した。本年度は、製作した金型部品を削って摩耗を擬似的に再現し、塑性加工の基本である打抜き・深絞り試験を実施して、AE（Acoustic Emission）センサから得られる電圧波形から金型故障の検出能力を検証した。その結果、AE センサの工程異常検出能力にはプレス条件によって一定の限界はあるものの、塑性加工によって生じている金属の物理現象を捉えることが可能であることを確認した。

## 1. はじめに

県内の自動車・航空機産業を支える機械部品の製造には大量生産に適したプレス加工が使用されている。プレス加工は切削加工と比較して、短時間で製品を生産できる反面、金型に故障が生じると不良品が大量に発生するという問題点を抱えている。そのため近年、金型の不良を素早く・正確に検出する技術が求められている。

このような背景のもと、昨年度は第1報<sup>1)</sup>として、金型部品の一部を切り離して、その切り離れた部品を加工することで、金型故障を任意に再現できる金型の設計・製作を実施した。本年度はこの金型を加工して擬似的に故障させて深絞り試験機に装着し、塑性加工の基本である打抜き加工・深絞り加工の2種類の試験を行った。塑性加工によって生じる金属の物理現象は弾性波を電圧として捉えることができる AE センサを使用して把握した。

なお、金型故障には欠損・亀裂・異物混入など様々な形態が考えられるが、人が確認できる明確な故障は他のセンサでも検出が明らかに可能であるため、今回は主に金型の摩耗に焦点をおいた。本報告では主に金型の摩耗について、塑性加工によって生じる物理現象と AE センサから得られた電圧波形を比較することで、AE センサの金型故障を検出する能力について考察した。

## 2. 試験内容

### 2. 1 測定装置の概要と測定方法

図1(a)は本試験に用いた深絞り試験機（現東京衡機試験機製造：35ton・f 自動型万能深絞り試験機）、図1(b)はこの試験機を使用して加工した製品の外観である。本来この試験機は深絞り試験の専用機であるが、金型に

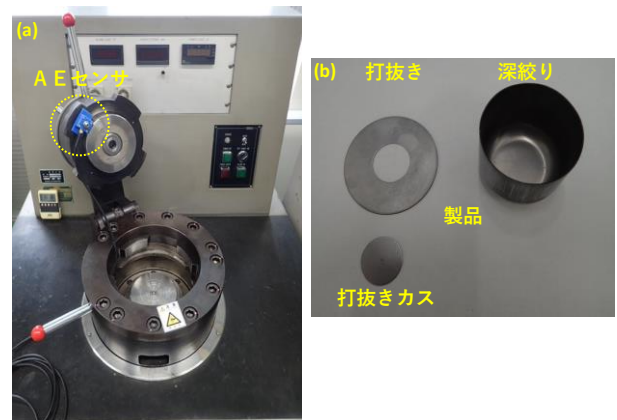


図1 深絞り試験機と加工した製品の外観

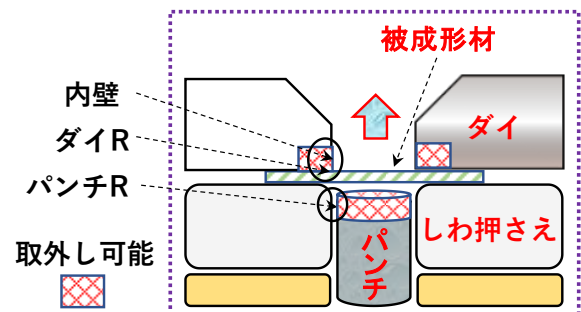


図2 摩耗加工の対象箇所

工夫を施すことで、打抜き加工と深絞り加工の2種類の加工に対応できるようにしている。また、金型を擬似的に摩耗させた状態を再現するため、以下の手順で取り外せる金型の一部品の加工を実施した。

表1 プレス試験の条件

加工内容	打抜き加工、深絞り加工
金型の材質	S45C
パンチ径	打抜き：Φ20mm 深絞り：Φ40mm
ダイ孔	打抜き：Φ20mm 深絞り：Φ42mm
しわ押さえ荷重	1.0 ton
パンチスピード	2.6～3.2mm/sec
被成形材（板厚）	SPCC (t=0.5mm) 打抜き：Φ50mm 深絞り：Φ80mm
絞り比	2.0
潤滑剤	牛脂黒鉛（固体潤滑剤）
金型の摩耗量 （各4水準）	打抜き：0g 約0.02g 約0.04g 約0.06g
	深絞り：0g 約0.2g 約0.4g 約0.6g
AEセンサ	フィンカリアコースティック社 型式：PK15I 共振周波数150kHz
アンプ	フィンカリアコースティック社 型式：EDGE NODE DISCOVERY 使用ゲイン：20dB

まず、加工時の金型のあたり具合を確認するため、2種類の加工をそれぞれ連続 20 回実施して金型を取り出し、金型の状態を目視とレーザ顕微鏡で確認した。その結果、あたりが強いパンチの R 部分・ダイの R 部分を主な摩耗加工の対象にした（図 2）。また、加工の際に被成形材が通過するダイの内壁にも接触痕が確認されたため、若干ではあるがダイの内壁も摩耗加工をした（概ね全摩耗量の 1/10 程度）。

金型の摩耗加工は、取外しができる金型部品を旋盤に取付け、金属やすりで粗加工、2 種類の紙やすり（＃240、＃1200）で仕上げ加工を実施した。金型の摩耗量は重量管理とし、新品の金型を含めると 4 水準の条件を整え、この摩耗加工した金型を試験機に取り付けた。なお、試験を実施する際には、パンチ・ダイともにほぼ同じ重量の摩耗加工した金型を使用している。

金型の摩耗量を含めたこれら一連のプレス試験の条件を表 1 に示す。なお、プレス加工から得られるデータはある一定のばらつきが生じることから、本報告書の測定値や特性図（図 4、図 7）は同一のプレス条件のもとで 5 回試験を実施して、その平均値を掲載した。

### 2.2 AEセンサについて

本試験では金型故障の検出に AE センサ（フィジカルアコースティック社製造：型式 PK15I）を使用した。AE（Acoustic Emission）とは、一般的に「材料の変形により亀裂が発生した際に材料内部に蓄積されたひずみエネルギーを弾性波として放出する現象」と定義されている。そのため、金型にかかる荷重があまり変動しなくても、対象物に弾性波が発生すれば信号として捉えることができる特徴を有している。金属の弾性波の周波数は約 150kHz であり、また高調波領域の金型故障の信号を検出できるようにするために、共振周波数約 150kHz、帯域幅約 1MHz の AE センサを使用した。なお、測定サンプリング周波数は、打抜きが 1MS/s、深絞りが 100KS/s で試験を実施した。

### 3 試験結果及び考察

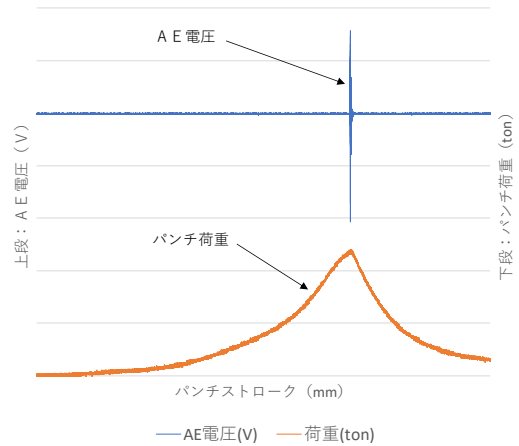


図3 AE電圧・パンチ荷重とパンチストローク特性（打抜き加工）

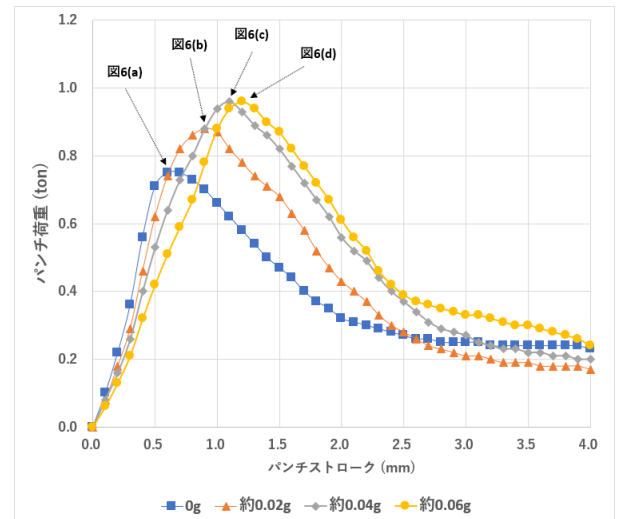


図4 パンチ荷重とパンチストローク特性（打抜き加工）

#### 3.1 打抜き加工試験

打抜き加工試験を実施した際の典型的な AE 電圧・パンチ加重とパンチストロークの特性を図 3 に示す。図のように、打抜き加工のパンチ荷重はパンチストロークとともに増加し、被成形材の破壊によって急激に荷重が低下する。他方、AE 電圧は材料が破壊するまで材料の亀裂による弾性波が発生しないため、あまり変動はないが、材料に破壊が伴うと大きな弾性波が発生するため、パルス状の電圧変動が確認できる。

この現象を基礎として、4 水準の金型の摩耗量を条件としたパンチ荷重とパンチストロークの特性を図 4 に示す。図より、金型を摩耗させると摩耗量の増加に伴い、被成形材が破壊するまでのパンチストロークが徐々に長くなり、パンチ荷重も徐々に大きくなっていることがわかる。これは摩耗加工の際にパンチ・ダイの R 部分を削っていることから、摩耗量の増加に伴いパンチ・ダイ間の剪断能力が劣化し、被成形材の剪断に必要なパンチ荷重が増加し、パンチストロークが長くなったためである。

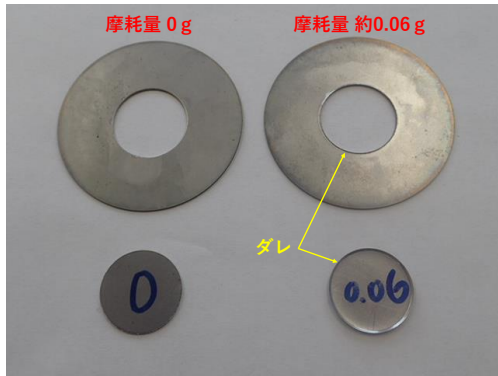


図5 打抜き試験後の製品と打抜きカスの外観

さらに、摩耗量がある程度進行すると、被成形材の剪断の際のパンチ荷重の最大値とパンチストロークの増加が鈍る傾向にあった。これは金型の摩耗のさらなる進行によって、剪断というより、両者間で被成形材を荷重で引きちぎる現象が生じているためである。

その証拠を裏付ける結果として、図5に摩耗量0gと摩耗量約0.06gにおける製品と打抜きカスの外観を示す。図5より、摩耗量0gの製品と打抜きカスはダレが全く確認できないのに対し、摩耗量約0.06gの場合には両者ともに円周状に大きなダレが生じている。このダレは摩耗量が多くなるに従って、高くなる傾向が確認された。また、金型の摩耗量の増加に伴うAE電圧波形を確認すると、前記図3のようにAE電圧のピークはパンチ荷重の最大値付近で発生することから、この値は摩耗量の増加に伴い、パンチストロークが徐々に長くなる位置に存在する傾向が見られた。

次に被成形材が破壊される前後の特徴を把握するため、4水準に設定した金型の摩耗量ごとのAE電圧のピーク付近の波形を観察した(図4を参照)。この様子を図6(a)～(d)に示す。

まず、摩耗量が0gの場合のAE電圧(図6(a))は、電圧の実効積分値(波形の大きさを数値で表した指標: Evi)が大きな値を示した。ところが摩耗量を約0.02g、約0.04gに増加させるとEviが逆に小さくなった。さらに摩耗量を約0.06gにするとEviが非常に大きくなるのがわかった。打抜き試験では擬似的な金型故障を再現する摩耗加工の際、ダイの内壁も若干削っていることから、摩耗量の増加とともにダイ孔の直径が若干大きくなっている。そのため、これらの現象は加工時の打抜きカスとダイの内壁との摩擦が小さくなり、ダイの内壁から発生する弾性波も小さくなったのが原因の1つと考えられる。しかし、摩耗量を約0.06gに増加させた場合、この摩擦はさらに小さくなるが、パンチ・ダイ間の剪断能力の低下に伴い、被成形材の破壊時に引きちぎられる現象によって発生する金属の弾性波の影響を受ける。そのため、Eviが大きくなったのではないのかと思われる。摩耗量の増加による、打抜きカスの大きなダレは、この現象を裏付ける結果を示している(図5を参照)。

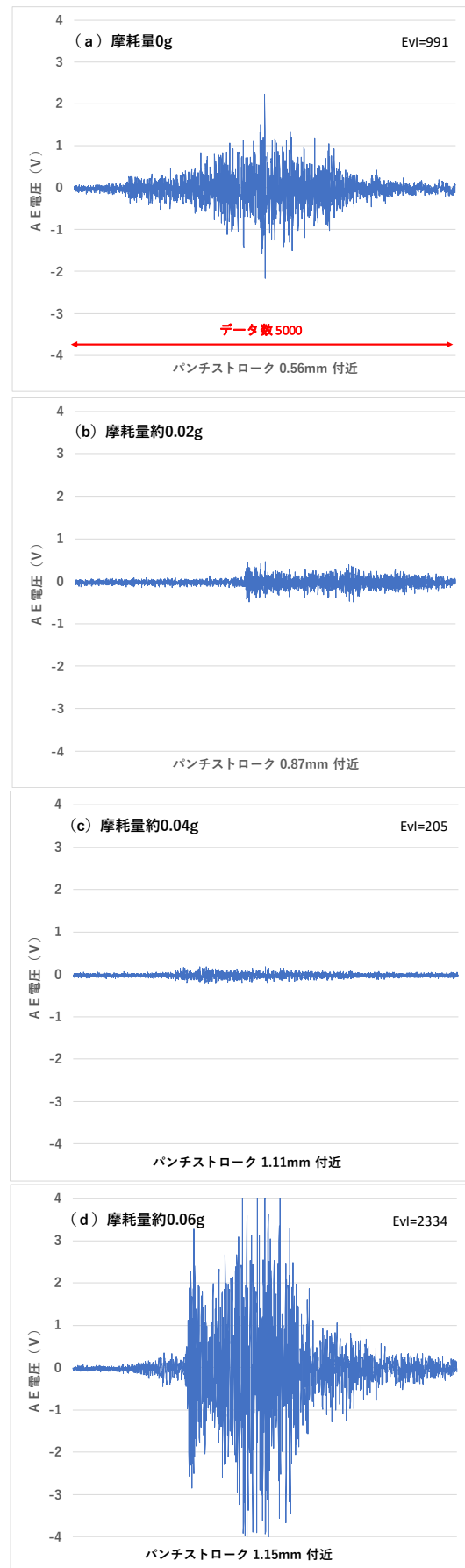


図6 ピーク荷重付近のAE電圧波形

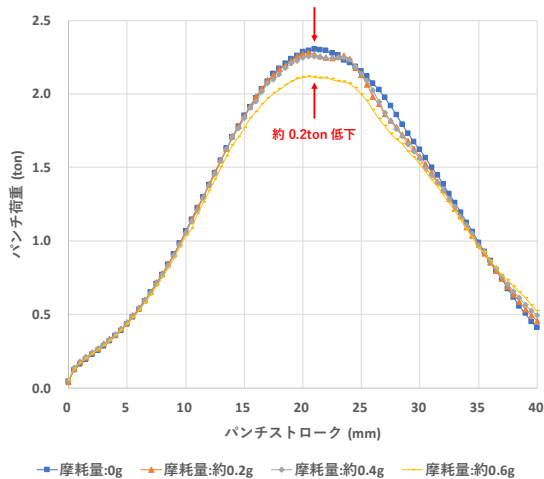


図7 パンチ荷重とパンチストローク特性 (深絞り加工)

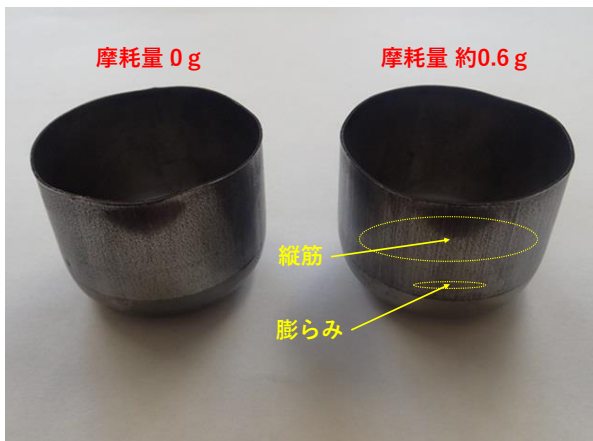


図8 深絞り加工後の製品の外観

最後に、本来の目的である金型故障が AE 電圧波形から検出可能かどうかを検討するため、電圧と摩耗量の関係を統計的手法から確認した。パンチストロークを変数として選定し、4 水準の AE 電圧を要素に分散分析と Bonferroni の多重比較を実施した<sup>2)</sup>。分散分析の結果、4 水準のデータ間に明確な差異の存在が確認された (有意確率:  $p = 0.000$ )。また多重比較の結果、摩耗量約 0.02g と約 0.04g の間にはデータの差異を確認できなかった ( $p = 0.446$ )。しかし、その他の水準の組み合わせでは、すべてのデータ間の差異を確認できた ( $p = 0.000 \sim 0.002$ )。これらの結果は、金型の摩耗量が大きくなれば、AE 電圧から金型故障の検出が可能であることを示していると考えられる。

### 3. 2 深絞り加工試験

深絞り加工を実施した際のパンチ荷重とパンチストロークの特性を図7に示す。この図より、金型の摩耗量が 0g～約 0.4g まで、特性に変化は現れなかったが、約 0.6g になるとパンチ荷重の最大値付近で約 0.2ton の荷重低下が確認された。金型の摩耗量がある一定以上増加すると、パンチ・ダイ・被成形材の密着度が低くなり、深絞り加

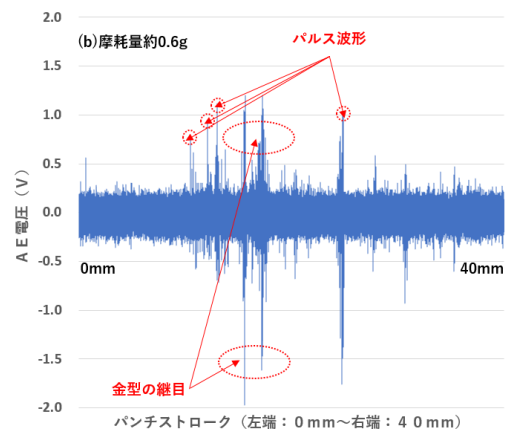
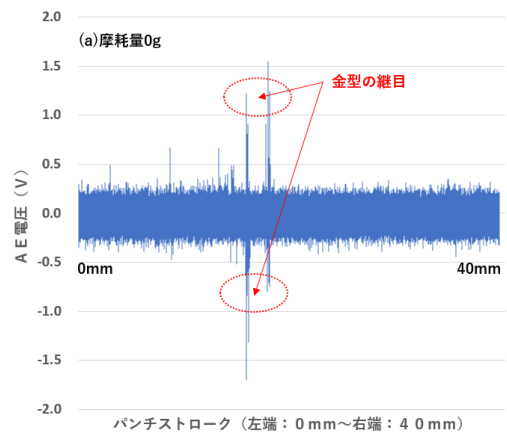


図9 AE 電圧とパンチストローク特性 (深絞り加工)

工時の三者間の摩擦力も減少する。その結果、パンチ荷重が低下したものと考えられる。

深絞り加工後の金型の摩耗量が 0g と約 0.6g における製品の外観を図8に示す。摩耗量約 0.6g の製品は 0g と比較して、製品の側面に縦筋があり、底部から約 10mm 程度上方の場所が円周状に若干膨らんでいることが確認された。

この現象が AE 電圧に現れているかどうかを確認するため、図9(a)(b)に金型の摩耗量 0g、約 0.6g のそれぞれの AE 電圧波形を示す。図より両波形を比較しても、図7で得られたパンチストローク約 20mm 付近の約 0.2ton のパンチ荷重の低下現象を波形で確認することができなかった。この原因として、AE センサは材料内部に蓄積された弾性波の検出を前提にしているため、低速・等速度でパンチが動作する材料破壊がない深絞り加工では、被成形材や金型から弾性波が発生しなかったためと推測できる。また、摩耗量約 0.6g の製品は側面が若干膨らんでいるが、同様に AE 電圧からその特徴を捉えることができなかった。この点では荷重センサと比較して、AE センサの金型故障の検出能力には限界があると思わ

れる。ところが、図9(a)(b)のAE電圧波形は以下の2つの特徴が現れた。

まず1つ目として、4水準のAE電圧波形すべてにパンチストローク12.5~20mmの範囲内に、約0.8~2.0Vの大きなパルスが2つ存在しているのが確認できた。本試験では、パンチは20mm・ダイは12.5mmの高さで、部品の一部を取外せる構造をした金型を使用している。この影響がAE電圧波形に現れている。これは、プレス加工時に金型の継目に大きな荷重が加われば、AEセンサがこの境界面から発生した弾性波を捉えていることを意味している。言い換えると、製品の生産時に使用している金型に亀裂が発生し、その箇所に荷重が加わるとAEセンサで金型故障の検出が可能であることを示している。このように、金型に継目が存在するだけでは、パンチ荷重に大きな変化は現れないと考えられるが、AEセンサでは大きな電圧信号として捉えることができる特徴がある。

2つ目として、金型の摩耗量が増加すると図9(b)のように、AE電圧波形全体にパルス波形が徐々に目立つことがわかった。本試験では、擬似的な金型故障を再現するため、人手による摩耗加工を実施している。そのため、摩耗量約0.6gの金型は0gと比較して、削った加工部分の表面が粗い。図8の製品側面の縦筋はこの影響を示している。よって、表面が粗い金型で深絞り加工を実施した結果、金属の弾性波が増加したのではないかと推測できる。すなわち、これはプレス回数が増加し金型の

表面粗さが増加すれば、AEセンサでこの現象を検出できる可能性があることを示唆している。

このようにAEセンサは荷重センサと異なった特徴があり、それぞれ異なる長所を有していることがわかる。

#### 4. まとめ

本年度は金型故障の原因として主に摩耗に着目し、その検出手段としてAEセンサを用いて試験を実施した。

AEセンサは金属の弾性波を検出するため、プレス条件によってはパンチ荷重に現れた塑性加工現象を適確に捕捉できない問題点も存在することがわかった。しかし一連の試験を通じて、金型の継目(亀裂)など、金型に弾性波が発生する環境では、たとえパンチ荷重に大きな変化が現れなくても、その塑性加工現象をAE電圧の変化で確認することが可能である。

今後、県内企業のプレス機の工程監視システムを想定し、連続深絞り試験機を用いてプレス回数を増加させた場合のAE電圧の長期的なトレンドを把握する。さらに、実際に機械部品を生産している現場での実機評価試験を通じて、プレス金型の故障診断手法の研究開発を引続き継続していく予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 横山ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 第6号, pp5-7, 2018
- 2) 大澤, わかる&使える統計学用語, pp283-284,305