

特集 AE法によるプレス加工状態監視技術の開発*

Improving Quality and Productivity through Newly Developed Acoustic Emissions Technology

村尾増昭 Masuaki MURAO 榊原 誠 Makoto SAKAKIBARA 鈴木春夫 Haruo SUZUKI 横川敦俊 Atutosi YOKOKAWA

Recently the economic condition is very severe for the manufacturing industry. Due to this condition, the most important item from the company's standpoint is for the production department to focus on cost reduction.

Our company produces car parts manufactured from press processes. If troubles occur during this process such as worn or broken die parts, defects increase significantly which translates into lost productivity.

In an effort to try to help reduce die parts cost and increase productivity we have developed a machine diagnostic technique called Acoustic Emission or AE. We monitored the AE during the press process and have determined there are differences in the AE during normal running time and when a die problem occurs. Further we have developed a way to determine die problems through differences in the AE wave and through extensive testing and verification have proven the system's effectiveness. Using these procedures we have designed new equipment to find press processing problems as they occur. We installed this system on the most difficult press process in our facility and as a result we found and judged correctly a die problem before it became a break down situation. So in conclusion we have determined that this automated system is a very effective way to increase quality and reduce die costs.

Key words : Machine diagnosis techniques, Acoustic Emission, Press processing, Automation of unusual distinction

1. はじめに

企業競争の激しい現在、コストダウン、品質向上への要求は厳しいものがある。プレス、樹脂成形に代表される部品加工現場においても、従来にも増してQ（品質）、C（コスト）、D（納期）に対する要求が厳しい。当プレス工場では、板厚数mm～十数mmの素材を高速・高精度でプレス品を大量生産しておりプレス加工不良を未然防止することは、Q・C・Dの上から重要である。

Fig. 1は当プレス工場のプレス加工不良状況であり、73%が金型に起因した不良である。このため、金型の状態を定量的かつ科学的に分析し、早期に異常を検知する技術の開発が重要な課題となってきた。そこで本開発では、設備診断技術の一手法であるAcoustic Emission（以下AE）法を応用し、インプロセスでプレス加工状態を診断する装置の開発に取り組んだ。

ここでAE法とは、固体が塑性変形または破壊する時に放出する弾性波（AE波と呼ぶ）を観測し、材料の破壊過程を解析する手法である。

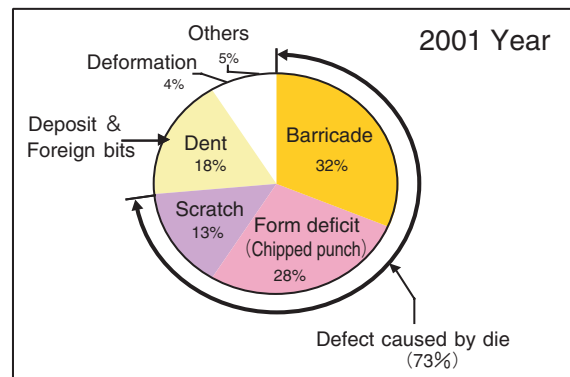


Fig. 1 Press defect mode

以下、本開発の成果を報告する。

2. プレス加工状態監視のための設備診断手法の検討

プレス加工の異常は金型の振動に現われると考え、まず振動診断による金型の固有振動と振動レベルの調査を実施した（Fig. 2）、その結果、固有振動および振動レベルを示すオーバーオール値の差はほとんどなく、正常・異常の判別は振動診断では不可能であった。

*（社）日本プラントメンテナンス協会の了解を得て、月刊誌「プラントエンジニア」2004年1月号より転載

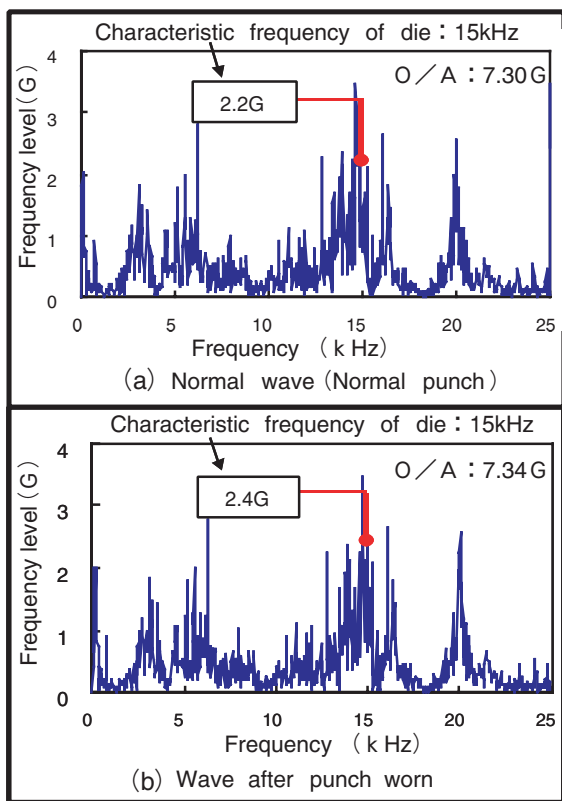


Fig. 2 Frequency analysis between normal punch and worn punch of die

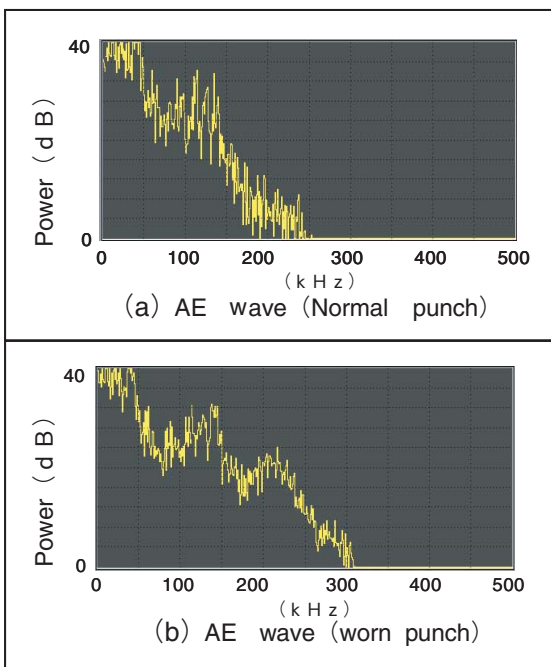


Fig. 3 AE wave between new punch and worn punch

そこでいろいろな診断手法を調査した結果、材料の破壊過程を解析する手法であるAE法に着目した。

Fig. 3は、金型パンチ新品時と摩耗進行時に測定し

たAE波を周波数分析したものである。金型パンチの新品時と摩耗進行時を比較すると200kHz前後に明らかに差があり、このAE波の変化に着目し、プレス加工の状態を特定する診断手法の研究開発を目指した。

3. 対象工程と加工概要

本研究の対象とした設備は、当プレス工場で不良数、消耗型費が最も多い長穴抜きプレス機とした。この金型は加工部に大小12本のパンチを持つ構成であり、板厚4.8mmの鋼板に一度に12箇所の長穴を円弧状に抜く (Fig. 4)。そのため、加工条件は非常に厳しく、以下の過程で製品のバリやパンチ折損による長穴の形状不良に至ると考える。

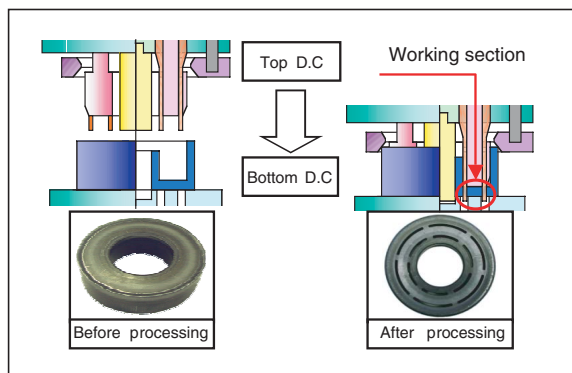


Fig. 4 Outline of stamping

- (1) 加工数の増加に伴い金型のパンチに微小亀裂や剥離が発生し抜き抵抗が増加する。
- (2) 抜き抵抗の増加により、パンチの摩耗が促進され切れ味が悪化し製品にバリが発生する。
- (3) 更に進行すると、パンチ内部の歪み量が増加し亀裂が発生して折損に至り製品の長穴形状不良が発生する。
- (4) また、異物が混入した状態でプレス加工を行うと製品はもとより、金型の寿命に大きく影響を与える。

そこで、実験にてプレス加工中の状態監視が可能か否かを確認することにした。

4. 実験によるAE法適用の確認

4.1 実験装置の概要

本実験における装置の概要と機能をFig. 5に示す。今回の実験は、対象設備の金型パンチ新品から寿命に至るまでのAE波の収集と、人為的に異物を混入して

打痕を発生させた時のAE波を収集し変化を検証することにした。ここで、金型パンチの寿命とは、製品のバリ高さが0.3mmになった時点または、金型パンチの折損が発生した時点をも寿命とした。

本実験では、AE波の動向を知るために、波形全体の実効値の収集と、実効値だけでは波形の特徴を捉えられないためAE波も同時に収集することにした。AEセンサから出力されたAE波の原波形は波形収集装置にて解析して、レコーダにてAE実効値の傾向把握を行うことにした。また、解析対象のAE波形を分別するためにプレス機からクランク角170°～190°の測定開始信号を受けてプレス加工時の信号のみを保存することにした。

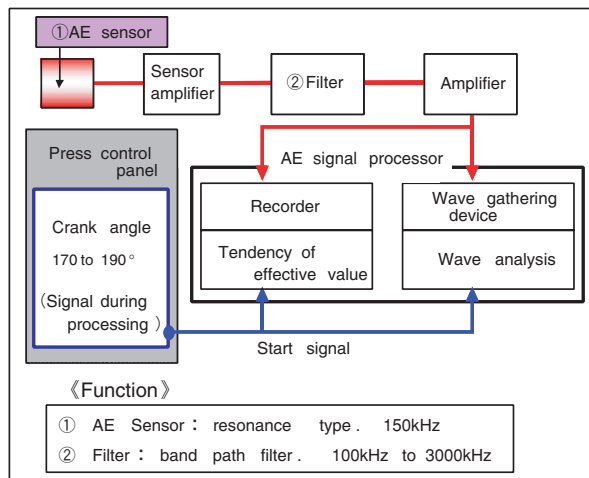


Fig. 5 Outline of test equipment

4.2 センサ取り付け位置による影響調査

実験を開始する前に、本実験装置を使いAEセンサの最適な取り付け位置の選定を行った。

AEセンサを金型に取り付けた場合の信号の減衰を考えると、製品と金型の接触面積はダイ側のほうが大きく、加工部で発生したAEの伝播に伴う減衰はダイ側のほうが少ないと考えられる。そこで、ダイの位置で模擬的に教師信号を発生させて、ダイセットとプレスベッドで減衰量を評価した。結果をFig. 6に示す。

ダイセットとプレスベッドでは若干の減衰が認められたが、両位置とも増幅器で十分対応が取れる範囲であるため、金型交換時のAEセンサの着脱および作業性を考え、プレスベッドにAEセンサを取り付けることにした。

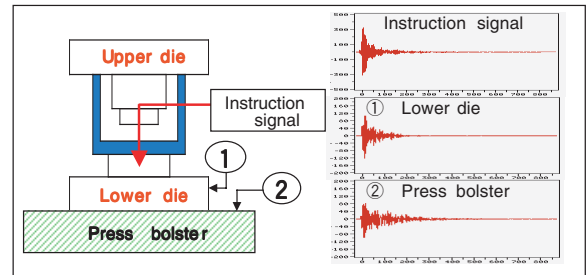


Fig. 6 Best location of sensor

4.3 実験による確認

対象の金型において、新品から寿命に至るまでの実験を行った。実験開始直後では実効値が高くなる傾向にあった (Fig. 7)。原因を調査した結果、金型の温度によるものであった。金型の温度が上昇し、約20分経過すると一定温度に達し、実効値も安定することが分った。20分後の安定状態における実験結果をFig. 8に示す。ここで、Fig. 8の横軸は加工数を表し、縦軸は実効値を表す。Fig. 8より、加工数の増加に伴い実効値が上昇している。Fig. 9は、金型の新品時と0.2mmのバリが発生した時点および金型が折損した時点と打痕実験を行った時のAE波形、実効値、金型の状態を示す。

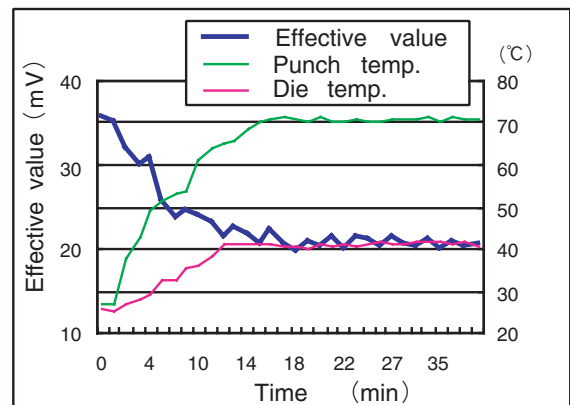


Fig. 7 Temperature and effective value

金型が新品の時の実効値は18mVに対しバリ発生時では原波形の振幅も大きくなり、実効値は60mVに増加して金型にも摩耗が発生している。また、金型の折損においては急激なAE波の振幅が発生し実効値も80mVに増加している。一方、打痕発生時には、金型パンチが製品に接触する直前に通常では発生しない大きなAE波が発生している。したがって、この実験からこれらの実効値とAE波を計測することにより、診断できると判断した。

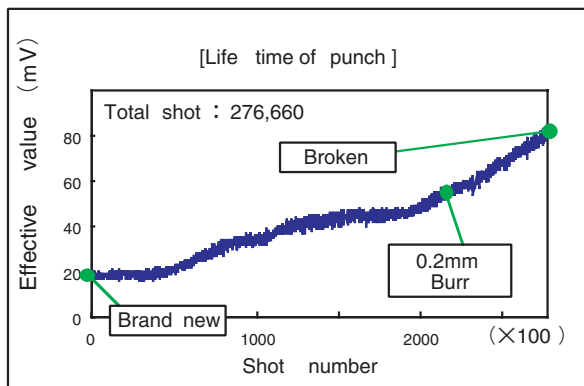


Fig. 8 Transit of effective value

No.	Item	AE wave	Effective value	Condition of die punch or product
①	New punch		18mV	 Normal
②	Burr occurrence 0.2 mm		60mV	 Punch wear
③	Punch breaking		80mV	 Breakage generating
④	Dent		45mV	 Dent

Fig. 9 AE wave, effective value and its phenomenon

5. プレス加工状態監視技術の開発

5.1 新たな診断方法の提案

従来のAE法による異常の判別はAE波形から実効値を算出して傾向把握を行うものである (Fig. 8)。この場合、金型の正常摩耗では、しきい値を定めれば正常/異常の判定は可能だが、金型に発生する小さな折損や異物混入による打痕が発生した場合、実効値では平均化されるため異常を見逃す可能性がある。そこで本研究ではプレス加工中のAE波形の最大値と面積の変化に着目し、以下の特徴を得た。

- (1) 摩耗進行では、新品時に比べ波形の面積が大きい。
- (2) 金型パンチ折損では、最大値が大きい。
- (3) 異物の混入による打痕では、金型パンチが製品に接触する直前の波形の面積が大きい。

以上のことから異常モード毎に判別を行うためには、摩耗進行や打痕では波形の面積の差で、また折損では最大値で異常判別が可能であると考えた。

5.2 信号処理方法の検討

AE波形の分析を行うにあたり、300kHzという高周波の原波形を表現するには、サンプリングの定理より600kHzでデータを収集しなければならない。Fig. 10の(A)に示すような数十万点からなるAE波形から面積を計算する場合、極めて高速な処理速度が必要となる。このAE波形の面積や最大値を確実にとらえるため、包絡線処理を採用した。包絡線処理とは、波形の特徴を把握するのに適した処理方法である。Fig. 10の(B)は包絡線処理後のAE波形である。

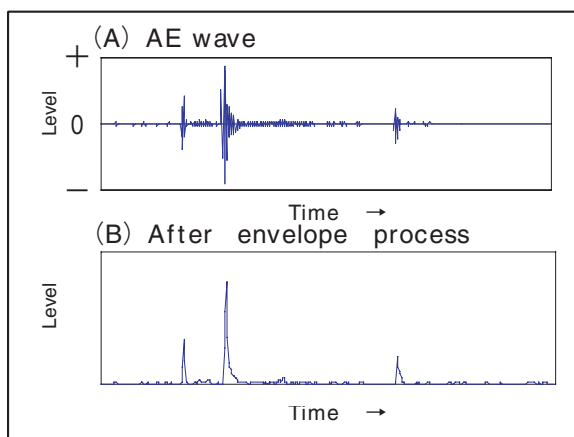


Fig. 10 AE wave and its envelope process

5.3 最適な測定範囲とタイミング

プレス加工中全体の波形から、金型パンチの折損、摩耗によるバリ発生や打痕の異常を判別するためには、プレス加工工程と発生するAEの関係を知る必要がある。本研究対象のプレス加工工程は、①ストリッパによる製品の固定 ②金型の下降 ③金型パンチによる抜き ④ストリッパの離脱という4工程に分けられる。それに対応したAEの発生はそれぞれ①ストリッパが製品に接触したときの衝撃 ②金型パンチが製品に接触したときの衝撃 ③製品を抜く時の製品亀裂の進行 ④ストリッパ離脱時の衝撃となる (Fig. 11)。上記タイミングに合わせてAE波のデータを収集すれば、異常モードごとの判別評価ができると考える。以下にその測定タイミングと判別方法を説明する。

- (1) 打痕評価：金型パンチが製品に接触する直前に異物の挟み込みで発生するAE波の面積で評価する。
- (2) 金型パンチの折損評価：金型パンチが製品に接触してから塑性変形過程でのAE波の最大値で評価する。

(3) 金型の摩耗によるバリ発生の評価：製品の亀裂・破断過程で発生するAE波の面積で評価する。
 なお、面積の算出方法としては包絡線処理後の積算値で行うことにした。

上記(1)～(3)の波形を正確に判別するためにそれぞれ個別に遅延トリガを使った診断開始信号を設定し、診断に必要な部分だけを抽出して評価することにした。

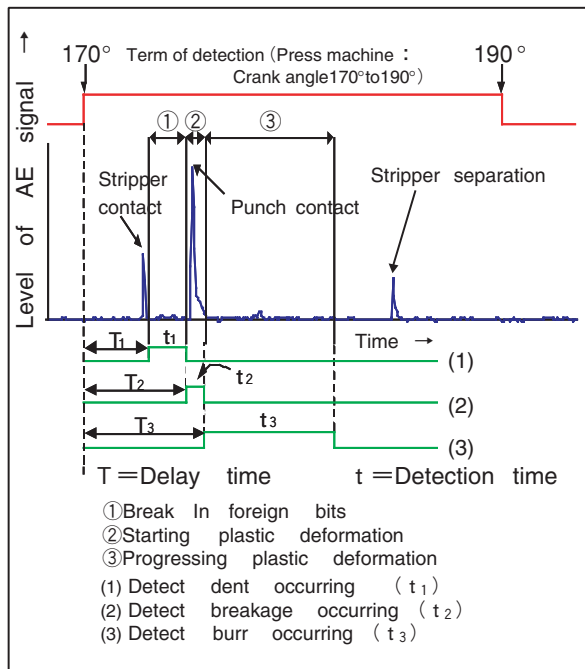


Fig. 11 General view of detection time

6. 提案した方法の検証

実験装置は第4章と同じものを使用し実験を行った。

6.1 異物の挟み込みによる打痕評価の検証

打痕については、人為的に異物を挟み込み、打痕を再現させた。金型パンチが製品に接触する直前のAE波の積算値を計測した結果 (Fig. 12), 打痕発生時は通常加工時には発生しない大きな値となり、打痕発生を容易に識別できる。

6.2 金型パンチ折損評価の検証

通常加工時の金型パンチ折損までの分析結果をFig. 13に示す。このFig. 13の縦軸はAE波の最大値を表し、横軸は加工数を表す。金型パンチの折損発生時には正常時とは違った大きなAEの振幅が発生しており、折損発生を容易に識別できる。

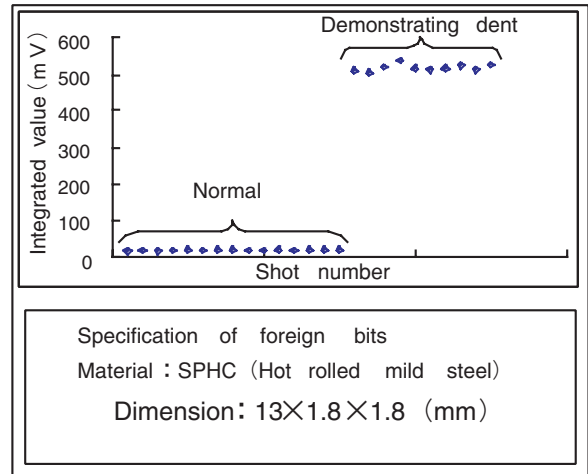


Fig. 12 Difference between normal and abnormal (Dent)

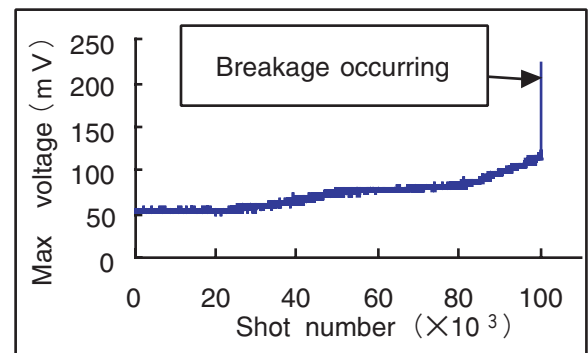


Fig. 13 Transition of a process

6.3 金型の摩耗によるバリ発生評価の検証

加工された製品を100個ごとに1個を抜き取りn=55において、実験装置の積算値と作業者の計測によるバリ高さの関係について回帰分析を実施した (Fig. 14). 製品のバリ高さとの積算値の相関係数は0.92と強い相関があり積算値で評価できる。

以上の検証結果から、プレス加工における状態監視技術が検証できた。

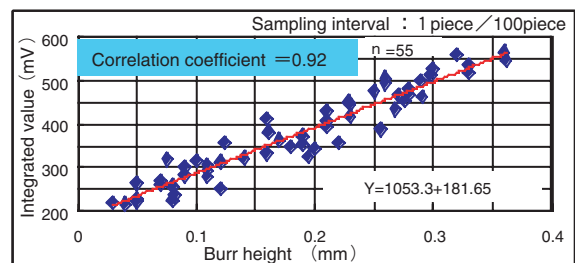


Fig. 14 Correlation between AE signal and burr

7. 診断装置の開発

7.1 開発にあたっての必要要件

- (1) 低価格で可搬性かつ汎用性と条件設定の容易化
- (2) 金型温度変化に対する診断値の保証
- (3) 異常判定の自動化と異常時の設備停止信号出力

7.2 金型の温度変化による診断値の保証

Fig. 15に示すように診断値が時間経過と共に変化する。本金型では稼働後20分経過すると金型の温度は安定し診断値も安定した。これは他の金型も同様であった。

実験データから0～20分間の診断値の変化は、経過時間を t (分) とすると次の近似曲線式で表される。

$$\text{診断値} = 0.239 t^2 - 10.852 t + 374 \quad (1)$$

そこで、加工開始直後は、しきい値を上記関係に基づき時間経過と共に変化させて加工状態に伴う診断値の変化に対応する。すなわち、加工開始から20分間の診断値補正係数は次式で表される。

$$m = \frac{0.239 (t)^2 - 10.852 (t) + 374}{0.239 (20)^2 - 10.852 (20) + 374} \quad (2)$$

m : 診断値補正係数 t : 金型稼働時間 (min)

したがって、20分後のしきい値に対し、加工開始直後のしきい値は m 倍すればよいと考えた。

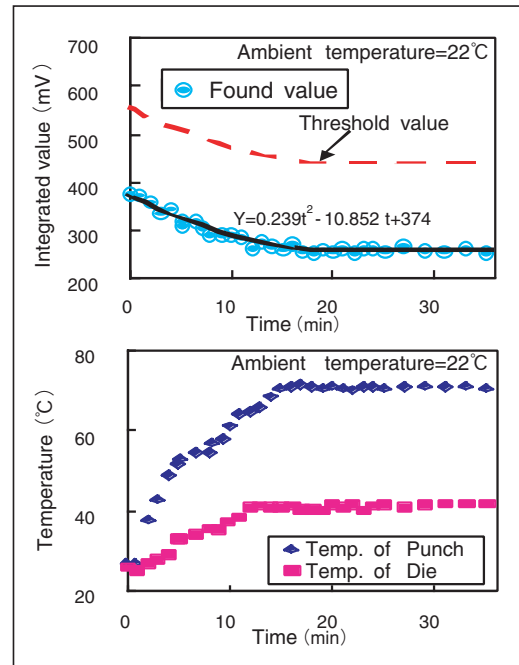


Fig. 15 Offsetting threshold value accorded to the temperature

7.3 診断装置の概要

本研究で行った実験検証結果から診断アルゴリズムを作成し、装置開発の必要要件に基づいた診断装置を開発した (Fig. 16)。

以下に診断装置の各機能について説明する。

- (1) フィルタ処理：対象周波数のみを抽出する。
- (2) 検波回路：絶対値変換と包絡線処理を行う。
- (3) 比較回路：打痕・バリ・折損発生の判断値と比較する。

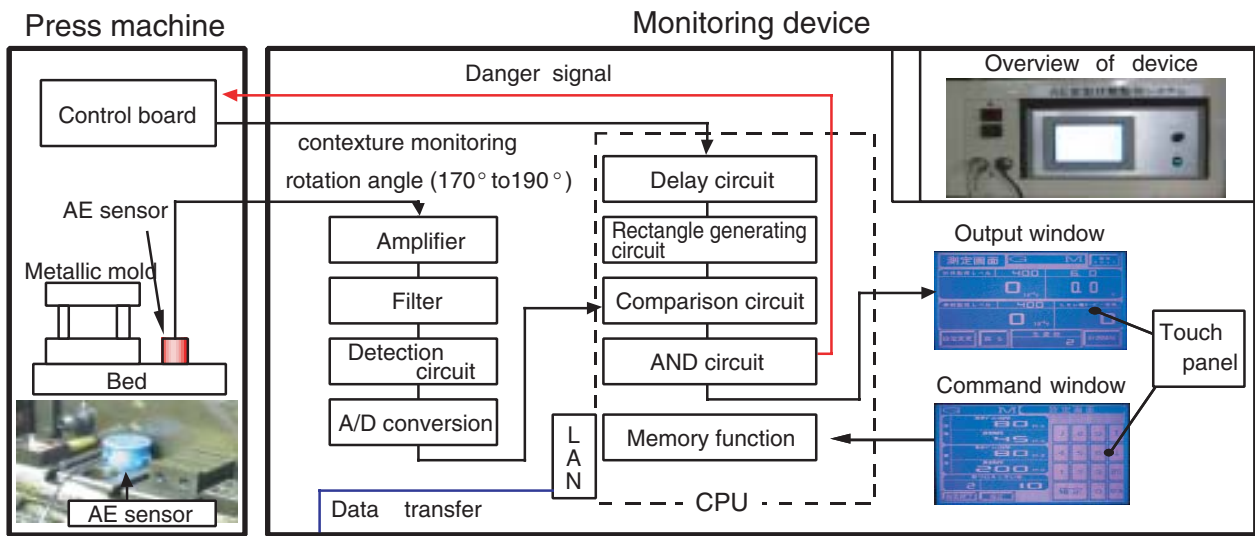


Fig. 16 Contexture and configuration of monitoring device

- (4) 遅延回路：設備からの診断開始信号を遅延し、各異常発生 の起点で信号を発生させる。
 - (5) 矩形発生回路：打痕・バリ・折損が生じる箇所の間、診断開始信号のパルスを発生させる。
 - (6) AND回路：判断値を超えたAEが出たことを判断し、設備停止命令を出力し設備停止を行う。
 - (7) 設備停止命令を出力し設備停止を行う。
 - (8) メモリ機能：金型毎の設定値を記憶する。
 - (9) 状態監視画面：タッチパネル方式にて、条件設定諸入力を簡単化にし、また診断結果を表示する。
- また、将来の一括管理も構想に入れ診断データをLAN機能で外部に情報を転送する機能も有する汎用性の高いシステム構成とした。

8. プレス加工工程への適用事例

開発した診断装置を対象のプレス加工工程に導入し、金型状態の診断を行った (Fig. 16)。実際の設備で金型の温度による診断値の影響も検証するため、ランダムに加工された製品を抜き取り、n=100において、本装置による診断値と作業者の計測によるバリ高

さの実測値との比較結果をFig. 17に示す。製品のバリ高さと診断値の相関係数は0.95であった。

また、金型の温度変化による診断値の影響も前項の補正値が正しいことを証明できた。

ここで、しきい値の設定は安全率を考慮し、積算値450mVになった時点とした。また、本診断装置で打痕の原因である異物の検出能力を検証した (Fig. 18)。このグラフの縦軸は診断値を表し、横軸は異物の体積を表す。通常加工時に混入する異物の大きさの場合、550mVに対し正常製品時では20mVで正確に異常を捉えている。それ以下は、診断装置の異物検出能力を検証するために、いじわるテストを実施したものであり、その結果1.0mm³までの異物検出能力を確認した。

更に、導入効果としては、Fig. 19に示すように金型に起因した加工不良と型費の大幅な低減を実現し、製造原価の低減に大きく寄与できた。

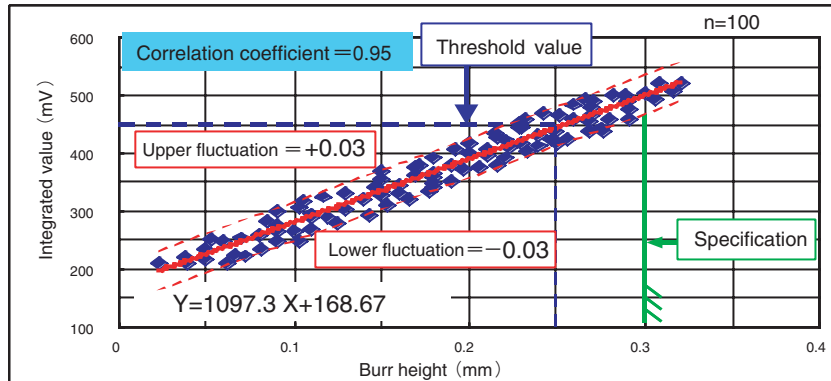


Fig. 17 Found value and actual phenomenon

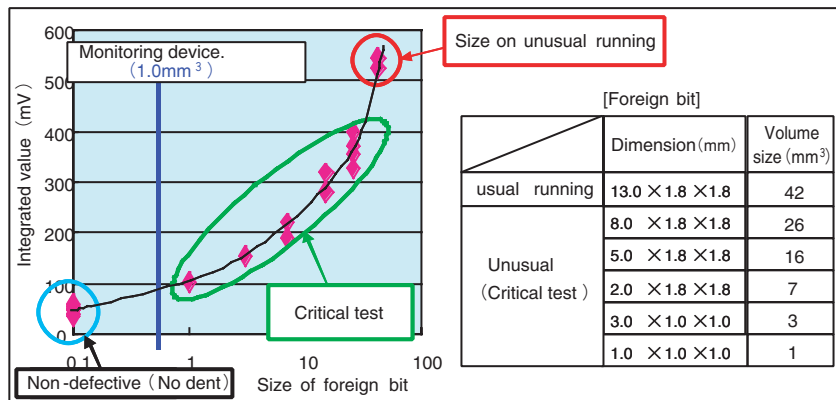


Fig. 18 Validation of detection capability

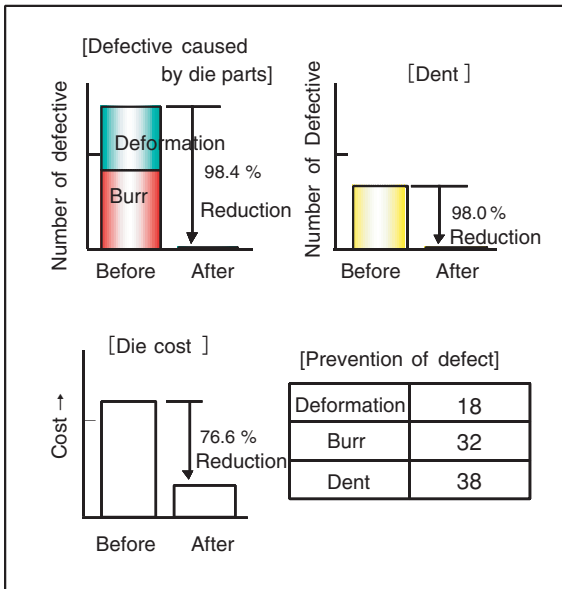


Fig. 19 Advantage

9. まとめ

- (1) 診断技術のAE法を応用して、異常を確実に捉えるための診断アルゴリズムを考え、これを付加したインプロセスで診断できる装置を開発した。
- (2) 対象のプレス加工工程に導入した結果、以下の成果が得られた。
 - ① 金型に起因した不良（バリ・形状不良）と打痕不良の大幅低減が実現できた。
 - ② プレス加工を状態監視することにより、生産条件でバラツク金型寿命の極限使用が可能となった。

③ 更に事前に設備を停止させることで、金型の折損防止が可能となり型費の大幅な低減を実現した。

当プレス工場においては、この開発技術を他のプレス機へ随時展開中である。

なお、本研究における成果を、AE法による異常判別の評価方法に関する特許として出願した。

10. おわりに

開発した技術および装置をプレス設備の付加機能として追加することにより、プレスの加工した状態を自動で診断し、プレス加工品の品質保証と金型の極限使用が可能となる。更に開発した技術はプレス加工にとどまらず、樹脂成形における金型の故障やスクリュの摩耗による成形不良、または高速スピンドルのベアリング状態診断など、個体の塑性変形や微小亀裂に起因する故障や品質保証に適用可能と思われる。したがって、本技術は部品加工などの検査レス化や無人化運転を実現する重要な要素の一つであると考えられる。

また、本診断装置をLAN機能にて振動やロボットなど既設の診断システムとネットワークにて統合を行い、設備・品質の一括管理を実現して、総合的な設備の診断システムとして統合し発展できると考える。

<参考文献>

- 1) 牧 修市：最新実用設備診断技術，総合技術センター（1990），pp.885-952.

<著 者>



村尾 増昭
(むらお ますあき)
冷暖房製造3部
設備診断技術開発に従事



榊原 誠
(さかきばら まこと)
冷暖房製造3部
技術士（経営工学）
TPM推進，加工技術・設備開発に従事



鈴木 春夫
(すずき はるお)
冷暖房製造3部
塑性加工技術開発及び型設計に従事



横川 敦俊
(よこかわ あつとし)
冷暖房製造3部
設備診断技術開発に従事