

プレス金型の故障診断手法の確立（第7報）

横山貴広*、佐藤丈士*、塚原誠也*

Establishment of failure diagnosis system for press die (VII)

YOKOYAMA Takahiro*, SATO Joji* and TSUKAHARA Seiya*

県内の機械・金属業界の生産システムの高度化・省人化を目的に、プレス工程の異常を早期に発見するシステムの研究開発を継続してきた。昨年度までは、生産プレス機や試験用の深絞り試験機に AE（Acoustic Emission）センサを取付け、金型の損傷や工程異常が発生した場合の AE 電圧波形の変化を捉えて、工程異常の検出能力を検証した。本年度は、県内企業の協力を得て、金属製品を生産するトランスファプレス機を対象にしたプレス試験と、工程異常を適確に判別する閾値の決定のため、試験データを利用したシミュレーションを実施した。さらに、この結果をプログラム化し、プレス工程の異常検出を目的とした故障診断システムを試作した。

1. はじめに

これまでにプレス工程の異常検出能力を検証するため、AE センサを用いた様々な試験を実施してきた^{1~4)}。その結果、AE センサは、被成形材に塗布する潤滑油の不良検出や、電圧波形の波形率の推移から、金型摩耗の進行状況が把握できる可能性が確認できた。また、深絞り試験機や万能試験機を用いた試験から、製品の異物混入打痕傷⁴⁾やパンチの損傷時の AE 電圧波形の特徴⁵⁾を把握できた。しかし、これらの知見を活かして生産プレス機の故障診断システムを構築する場合、県内製造業の製造工程は、工程管理が優れ、高品質な製品を製造しているため、正常な工程のデータを収集できても、工程異常のデータを収集することが難しく、正常と異常の境界を適確に決定することは困難である。このため、工程異常のデータが十分に集まらないことを前提として、過去のプレス試験の結果から得られた知見と条件の異なるシミュレーションを繰り返し実施して、正常な工程を確実に正常と判別できるシステムの構築を目指した。

本年度は県内企業の生産プレス機の工程異常をリアルタイムで検出することを目的とした故障診断システムの試作を実施した。そのため、県内協力企業の生産プレス機で正常な工程のデータを多数収集し、正常な工程に対するシステムの信頼性を向上させるため、シミュレーションを実施して特徴量・計算方法・閾値を決定し、このシミュレーション結果をプログラム化して故障診断システムに組み込み、システムを完成させた。本報告では、以上について詳細に記述する。

2. プレス試験

試作する故障診断システムの閾値をシミュレーションで決定するためには、対象となるシミュレーションデータが必要となる。このデータを収集するため、県内協力



図1 システム構成の概要

表1 プレス試験条件

プレスの種類	トランスファプレス（全5工程）
対象製品	金属製品
AEセンサ	フィジカルコースティック株式会社 型式：PK15I（共振周波数 約150kHz） 2個
センサアンプ ゲイン	0dB
プレス試験	第1回目 約220,000ショット 第2回目 約102,000ショット
センサ設置箇所	AEセンサ1（第3工程）、AEセンサ2（第1工程）
特記事項	第1回目・第2回目ともに工程異常は発生しなかった

企業で実際に金属製品を生産しているトランスファプレス機を用いてプレス試験を実施した。図1はシステム構成の概要、表1はプレス試験条件を示す。システムは主に制御用PC、AEセンサ、センサアンプ、メモリハイコーダ、同期用センサで構成されている。さらに、工程異常を検出した場合、それを現場の作業者に知らせるバトライトも設置した。AEセンサは、プレス時の金属の弾性波を適確に捉えるため、周波数約150kHzで最も感度が高い特性があるものを使用した。また、使用した2つのセンサは、トランスファプレス全5工程のなかで、経験的に異物が混入しやすい工程である第3工程と、過去に潤滑油の不良により切刃が損傷したことがある第1

*機械部

工程の2箇所を設置した。試験は第1回目約220,000ショット、第2回目約102,000ショットの合計約322,000ショット実施した。プレス試験の結果、2回の試験ともに、工程異常（製品異常）は発生しなかった。

3. シミュレーション

3.1 工程異常検出項目と閾値の決定について

故障診断システムの構築には、工程異常検出項目と閾値の決定が必要となる。工程異常検出項目は、県内協力企業からの要望項目、過去に企業の生産プレス機（順送プレス、トランスファプレス）で工程異常が発生した際の結果と深絞り試験機の試験結果、岐阜大学との共同研究の結果⁵⁾を勘案して、AE電圧波形に特徴的な変化が確認された表2の項目①～⑤に決定した（1ショットのAE電圧波形は図2を参照）。また、5項目の工程異常検出に使用したAE電圧波形と特徴量は、過去の試験結果の知見を考慮した。なお、実際に項目⑤（金型の摩耗）については、図3のようにプレス回数が多くなるほど、波形率が上昇傾向を示すことが確認されたが、実際に金型の摩耗量と波形率の推移の整合性が取れていない。そのため、この項目に関しては、故障診断システムを構築する際に、工程異常ではなく警告として取扱い、金型の摩耗が進んでいる可能性があることを作業者に視覚的に示して対応している（図9を参照）。

次に、工程異常判別の閾値の決定について考える。プ

表2 工程異常検出項目

項目	工程異常検出項目	使用したAE電圧波形	特徴量
①	製品の異常 (明らかなもの)	1ショット毎の 全体波形	積分値の移動平均線 からの乖離
②	金型の異常	主プレス前の波形	積分値の占有率
③	異物混入打痕傷	主プレス領域の波形	積分値の占有率
④	潤滑油の異常	主プレス後の波形	重み付けした積分値
⑤	金型の摩耗	1ショット毎の 全体波形	波形率

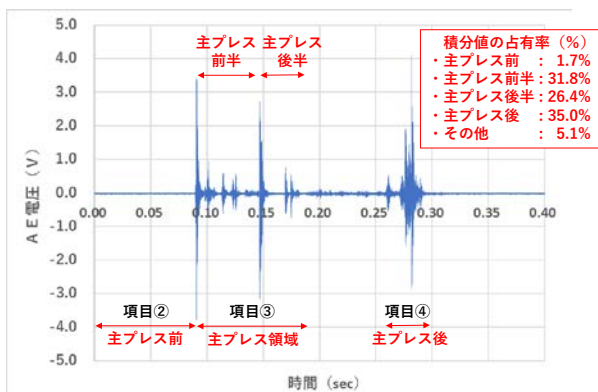


図2 1ショットのAE電圧波形

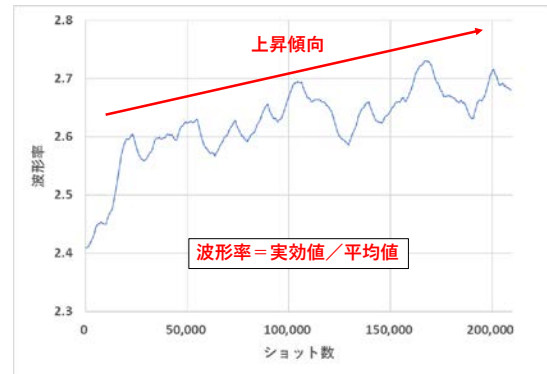


図3 波形率の推移（移動平均線 10,000）

レス工程は環境（プレス機の整備状況、雰囲気・室温など）やプレス回数に応じて、金型の温度や摩耗状況、潤滑油の粘性などが徐々に変化するため、これに伴い正常な工程と判断される閾値の基準も徐々に変化することが予想される。よって、閾値はあらかじめ設定した一定値ではなく、複数回のプレスによるAE電圧波形の特徴量の変化を計算して基準値を決定し、この基準値と1ショット毎に計算した特徴量を比較しながら閾値を変化させ、工程異常の有無を判断するようにした。

閾値は正常な工程と工程異常のデータがそれぞれ多数存在し、両者を比較して、その境界に設定するのが理想である。しかし、現実にはほぼ100%正常な工程のデータのみで構成されている。今回の約322,000ショットで生産した製品は、すべて正常だったことがわかっている。よって、このデータを用いたシミュレーション結果からすべて正常と判別できる領域に閾値を設け、閾値から外れたデータを異常として判別する方法を採用した。また、正常と異常の境界付近に警告を示す領域を設けた。この警告領域を設けることで、短時間に警告が頻発した場合、現場の作業者は工程異常が近いと予測することができ、予防保全への対応を促す役割を持たせている。

3.2 シミュレーション結果について

シミュレーションを実施する際、まず表2の特徴量を用いた計算式のプログラム化を実施し、今回実施した試験のすべてのプレスデータが正常と判別するまでシミュレーションを繰り返し、計算式を修正しながら閾値を調整した。したがって、シミュレーション結果は、工程異常が存在せず、警告のみの表示とした。このような一連の過程で実施したシミュレーション結果を表3に示す。表3より、主に以下の2つの特徴が確認できた。

まず、AEセンサ1と2の結果を比較すると、AEセンサ2の方はシステムの示した警告数が多いことがわかった。AEセンサ2は被成形材に潤滑油を塗布し、この材料を切断する第1工程に設置している。今回使用したAEセンサは過去の試験から潤滑油の塗布量に敏感に反応することがわかっている。第1工程は被成形材を切断する際の振動と、潤滑油を塗布する工程が重なりあっているため、AEセンサ1を設置した第3工程より、AE電

表3 シミュレーション結果

AEセンサ1				
試験回数-ショット数	警告の内容	特徴量		
		移動平均線の乖離 (%)	積分値の占有率 (%)	波形率
1-22250	主プレス 後半 下限	-	22.3	-
1-22261	主プレス 後半 下限	-	21.1	-
1-22264	主プレス 後半 下限	-	22.4	-
1-22275	主プレス 後半 下限	-	22.2	-
1-22992	主プレス 後半 下限	-	22.3	-
1-110196	主プレス 後半 下限	-	18.5	-
1-130061	主プレス 後半 下限	-	22.4	-
1-143969	主プレス 後半 下限	-	22.0	-
1-156247	波形率 (レベル1)	-	-	2.93
2-18072	全体 移動平均 下限	-20.5	-	-
2-18374	全体 移動平均 下限	-20.2	-	-
2-55062	波形率 (レベル1)	-	-	2.94

AEセンサ2				
試験回数-ショット数	警告の内容	特徴量		
		移動平均線の乖離 (%)	積分値の占有率 (%)	波形率
1-5807	全体 移動平均 上限	40.1	-	-
1-20036	主プレス 前半 下限	-	21.0	-
1-39978	主プレス 前半 下限	-	20.4	-
1-52470	主プレス 前半 下限	-	21.0	-
1-57089	主プレス 前半 下限	-	20.8	-
1-78031 (図8)	全体 移動平均 上限	42.3	-	-
1-139874	主プレス 後半 下限	-	17.5	-
1-150408	主プレス 前半 下限	-	21.1	-
1-152855 (図6、図7)	主プレス 前 上限	-	4.6	-
1-201647	主プレス 後半 上限	42.1	-	-
1-201652	主プレス 後半 上限	42.5	-	-
1-201653	主プレス 後半 上限	42.3	-	-
1-201654	主プレス 後半 上限	42.1	-	-
1-201658	主プレス 後半 上限	42.2	-	-
1-201664	主プレス 後半 上限	41.5	-	-
1-201669	主プレス 後半 上限	41.5	-	-
1-201692	主プレス 後半 上限	42.0	-	-
1-201698	主プレス 後半 上限	43.3	-	-
2-44434	主プレス 前半 下限	-	25.2	-
2-54703	全体 移動平均 下限	-20.1	-	-
2-54988	全体 移動平均 下限	-20.6	-	-
2-55066	全体 移動平均 下限	-22	-	-
2-55076	全体 移動平均 下限	-20.6	-	-
2-55083	全体 移動平均 下限	-21.8	-	-
2-55370	全体 移動平均 下限	-20.3	-	-
2-56583	全体 移動平均 下限	-20.8	-	-
2-58986	全体 移動平均 下限	-20.2	-	-
2-87302	全体 移動平均 下限	-21.1	-	-

圧波形の変化が相対的に大きいことが予想され、その影響により警告数が多く発生したものと推測できる。

2つ目に、表3のように、警告が短期間に頻発していたこともわかった。繰り返し実施した一連のシミュレーションのなかで、閾値をさらに厳しくした場合、警告の大半が短期間に頻発することも確認している。この警告が頻発した時間帯を調べたところ、1日の業務開始後の約30分以内に集中していることがわかった。プレス試験を実施した県内協力企業は毎日の業務開始前にプレス機の点検整備を実施している。業務開始直後は点検整備の状況を含め、金型の温度、潤滑油の粘性などの状態が、日中の連続運転時とは異なっており、この影響が短時間の警告の頻発に現れたと思われる。今後、この業務開始後のプレス工程の状態をどのように取り扱うのが、システムの信頼性を考えるうえで1つの課題として残されている。

次に、実際にシステムが警告を発した際のAE電圧波形の特徴について述べる。図4、図5は正常な工程で取得した典型的なAE電圧波形、図6、図7は主プレス前の波形に警告が発生した事例、図8は全体的に積分値が

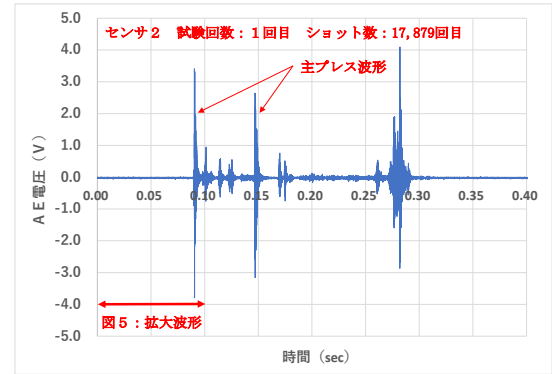


図4 正常な工程の典型的なAE電圧波形

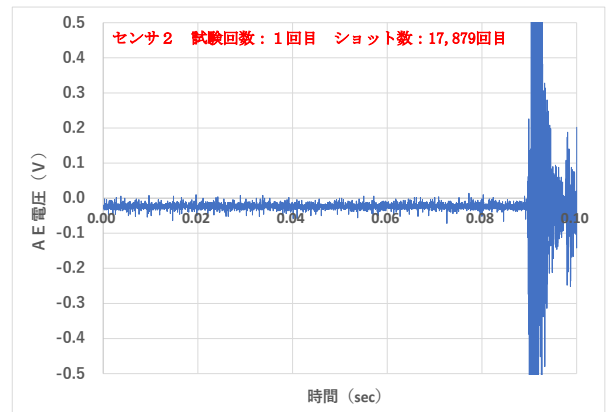


図5 図4の主プレス前領域の拡大波形

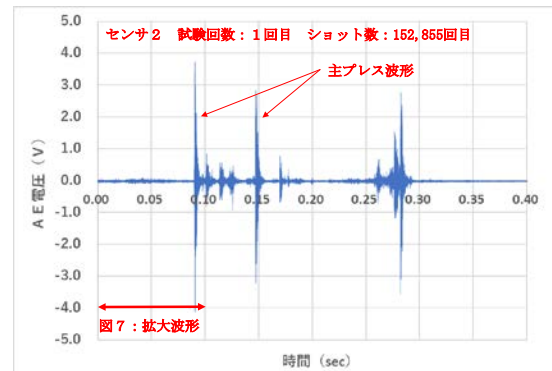


図6 主プレス前に警告が発生したAE電圧波形

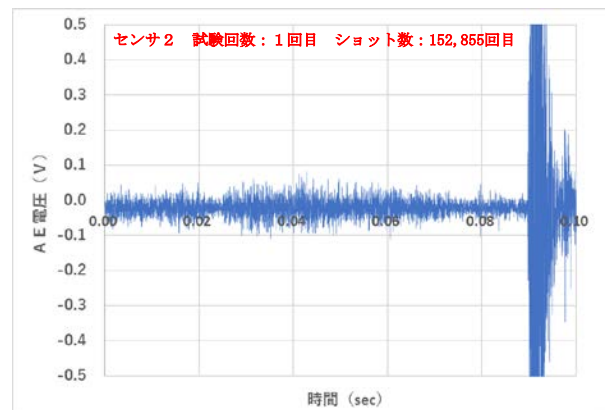


図7 図6の主プレス前領域の拡大波形

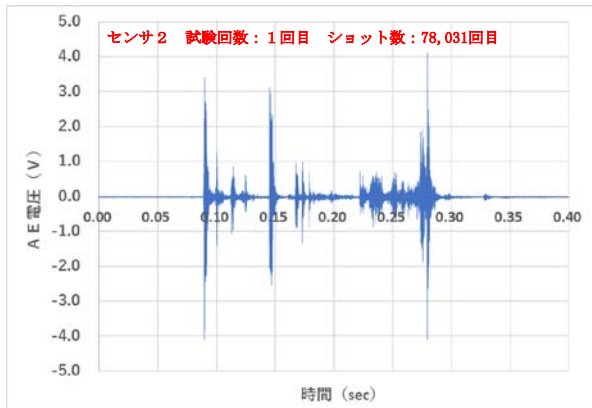


図8 波形全体に警告を発したAE電圧波形

大きい波形に警告が発生した事例である。

図4と図6を比較しても、波形に大きな相違は見当たらないが、主プレス前の拡大波形である図5と図7を比較すると、明らかな違いが確認できる。岐阜大学との共同研究の知見⁵⁾より、このような主プレス前の波形は、金型と被成形材の接触時に金型に通常とは異なる負荷が生じたためと思われる。次に、図4と図8を比較すると、図8は全体的にAE電圧波形の積分値が大きい。これは、正常なばらつきの範囲内と考えることもできるが、図8は積分値が基準値より40%以上大きかったことから警告とした。今後、実際に工程異常が生じた場合、これらの警告波形を蓄積・分析することで、異常予知の傾向を把握できると考えている。

4. 故障診断システムの試作

以上のシミュレーションの結果をプログラム化し、図1のシステムで構成しているハードウェアに組み込んで故障診断システムを試作した。試作した故障診断システムの外観とシステムの画面を図9に示す。図9より、システムは1つのワゴン台車にすべて搭載し、工場内を柔軟に移動できるようにした。また、システムは県内企業の要望もあり、工程異常をリアルタイムに判別する機能だけでなく、稼働率も表示できるシステムになっている。今回、第1回目の試験では稼働率が24.6%、第2回目は32.0%を示した。この稼働率は、夜間や休日など本来業務が停止している時間も考慮されている。そのため、日中の業務稼働時間のみを考慮した稼働率を再計算すると、第1回目は82.9%、第2回目は90.2%を示した。

以上のように、故障診断システムの試作品は完成したが、このシステムには大きく2つの課題が存在する。まず1つ目は、正常な工程のデータのみでシミュレーションを実施してシステムを構築したため、正常な工程を正常と判別する信頼性は高いが、工程異常を正常と誤判定する危険性が存在する。特にAE電圧波形が大きく変化しない工程異常が発生した場合、誤判定が起きやすいと思われる。2つ目として、本システムはすべての工程

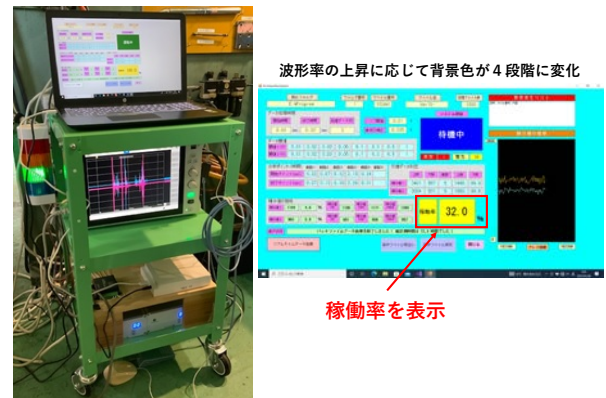


図9 故障診断システムの外観とシステムの画面

異常を検出の対象にできるのではなく、あくまでもAE電圧波形に変化がある工程異常の検出のみを対象としている点である。今後、プレス試験を継続しながら、工程異常のデータを蓄積・分析するとともに、異常検出に必要な特徴量の選択、計算方法の考案、シミュレーションを重ねることでシステムの完成度を高めていくことが必要である。

5. まとめ

本年度は県内企業の協力を得ながらプレス試験と蓄積したプレスデータを利用してシミュレーションを実施し、故障診断システムを試作することができた。試作したシステムは、前記のような問題点が存在するものの、工程異常のデータを収集しながら、最適な特徴量の選択と異常検出に関する計算方法を考案して、繰り返しシミュレーションを実施し、その結果を詳細に検証することで、システムの信頼性の問題を1つずつ解決できている。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、プレス試験に協力して頂いた株式会社ツカダに深く感謝をいたします。

【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) 横山ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告第7号, pp5-9, 2019
- 3) 横山ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No1, pp1-4, 2020
- 4) 横山ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No2, pp5-8, 2021
- 5) 村瀬・山下ら, No19-332 日本機械学会第27回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2019) 論文集 2019.11.20-22, 福井