

高速度カメラと超解像処理による プレス加工金型の微小ひずみ測定技術に関する研究

北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部 工業試験場 材料技術部
主査 鶴谷 知洋

(2020 年度 一般研究助成 AF-2020010-B2)

キーワード：高速度カメラ，超解像処理，微小ひずみ

1. 研究の目的と背景

プレス加工は、他の加工法と比較して加工速度が大きく、加工コストも安いことから、自動車産業を中心としたあらゆる分野において量産加工技術として広く普及している。プレス加工の生産現場では、工程内での抜き取り検査はあるものの、後工程でロット毎に品質検査を行うことが多く、加工速度も大きいことから、一度不良が発生すると大量の不良品が生産される恐れがある。不良品の大量発生を防止するには、不良が発生した時点で瞬時に加工を停止することが重要であり、そのためには工程内で加工状態を認識することが求められる。工程内で加工状態の認識を図る既往の研究として、超音波¹⁾、AE (Acoustic Emission)^{2),3)}、金型の変形の測定⁴⁾を用いた試みがなされている。超音波を用いた場合、センサの取り付け時に金型への追加加工が必要であること、金型の剛性や製品の加工精度などが課題である。AE を用いた場合、AE 信号がノイズに弱くかつ再現性に問題があること、対象とする信号の周波数が高く特徴を逃さないためには扱うデータ数が膨大となることなどが課題である。金型の変形の測定は、ひずみゲージなどを用いる接触式と画像やレーザ変位計を用いる非接触式に大別される。接触式は超音波と同様にセンサの取り付け時に金型への追加加工が必要であること、金型の剛性や製品の加工精度などが課題である。非接触式の中でも画像の場合、単位時間当たりの撮影コマ数を多くするには解像度を小さくする必要があること、すなわち微小時間でひずみ測定を行うと測定精度が低下することが課題である。

本研究は、加工状態認識のための画像による非接触での金型ひずみ測定にあたり、微小時間で高精度なひずみ測定が可能な基礎技術の開発を目的として、低解像度画像から高解像度画像を再構成する超解像処理⁵⁾の有効性を評価する。具体的には、始めに引張試験を対象にひずみゲージによるひずみ測定と超解像処理前後の画像によるひずみ測定を比較することで、超解像処理の有効性を確認する。次に、プレス加工中の金型を対象にひずみゲージによるひずみ測定と超解像処理前後の画像によるひずみ測定を比較することで、プレス金型の微小ひずみ測定に対する超解像処理の有効性を評価する。

2. 引張試験におけるひずみ測定

2.1 実験方法

引張試験は万能材料試験機 (AG-100kNXplus 株式会社島津製作所製) を用いて試験速度 20 mm/min で行った。使用した試験片形状を図 1 に示す。材質は冷間圧延鋼板 (SPCC, 公称板厚 1.0 mm), 寸法は JIS Z2241 の 13A 号に準拠した。試験片表面は、画像によるひずみ測定を行うため白色のラッカースプレーの塗布・乾燥後、黒色のラッカースプレーで大きさの異なる黒点のランダムパターンを作成した。試験片裏面は、ひずみゲージによるひずみ測定を行うため 3 軸のひずみゲージ ($\phi 11$ mm) を貼り付けた。試験片の外観を図 2 に示す。

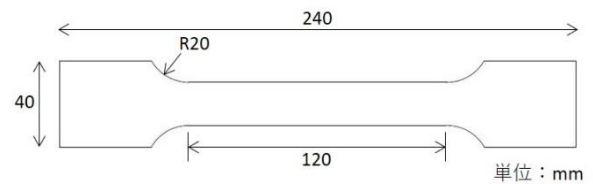


図 1 試験片形状

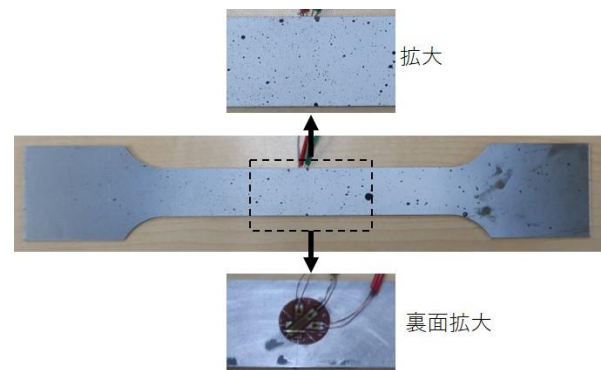


図 2 試験片外観

引張試験中の試験片表面を高速度カメラ (FAST CAM Mini AX200 株式会社フォトロン製) を用いてフレームレート 5000 fps で撮影し、撮影した画像のうち最初の 1 枚と指定時間の 2 枚の画像を DIC 法⁶⁾のソフトウェア (sDIC 西華デジタルイメージ株式会社製) で処理することで画像によるひずみ測定を行った。また同時に、引張試験中の試験片裏側のひずみゲージをデータロガー (EDX-10A 株式会社共和電業製) に接続し、サンプリン

グレート 5000 Hz でひずみを測定した。なお、高速度カメラとデータロガーの測定開始はトリガ入力にて同期させた。実験環境を図 3 に示す。

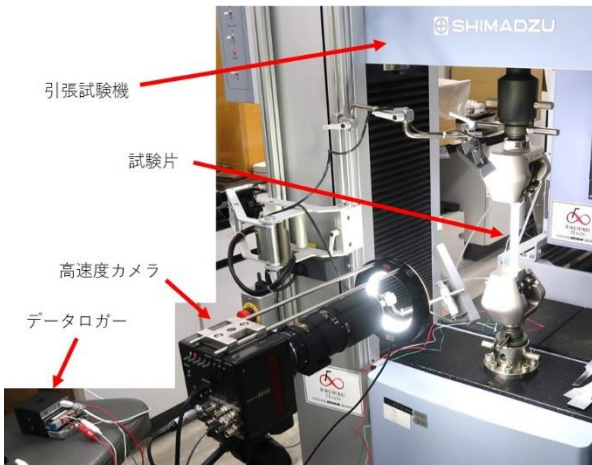


図 3 実験環境 (引張試験)

超解像処理は、学習済みの深層学習型モデルのアルゴリズム (ESRNet⁷⁾) と、事前撮影した高解像度画像により学習済みモデルを調整するアルゴリズム (Pseudo-SR⁸⁾) を用いて行った。また、超解像処理結果と元画像の比較を行うにあたり、画像サイズを揃えるため最近傍補間法により元画像を拡大した。

2.2 実験結果および考察

ひずみゲージによる引張試験中の鉛直方向のひずみ測定結果を図 4 に示す。試験速度が一定であることからひずみも一定の割合で大きくなっている。画像による鉛直方向のひずみ測定結果を図 5 に示す。裏面のひずみゲージ貼り付け位置に相当する表面位置の 11 mm×11 mm の領域の平均ひずみ値は、0.01 秒で 27 μ ST, 0.1 秒で 213 μ ST, 1 秒で 2369 μ ST である。ひずみゲージによる測定と同様に、時間経過とともにひずみ値が大きくなっている。また、ひずみゲージによるひずみ値は、0.01 秒で 22 μ ST, 0.1 秒で 227 μ ST, 1 秒で 2199 μ ST であり、画像によるひずみ測定結果と 10% 程度の差異がある。これは、面内で不均一に変化する試験片表面のランダムパターンの変形・移動を精度よく追跡できていないことなどが原因と考えられる。

引張試験片上に作成したランダムパターンへの超解像処理結果を図 6 に示す。最近傍補間法による拡大した画像に対して、ESRNet, Pseudo-SR ともにランダムパターンの輪郭が明瞭になっている。また、ESRNet と Pseudo-SR を比較すると Pseudo-SR の方が白黒の差や輪郭が明瞭でランダムパターンの再現性が良好である。これは、事前撮影した高解像度画像による学習済みモデルの調整が有効であったためと考えられる。

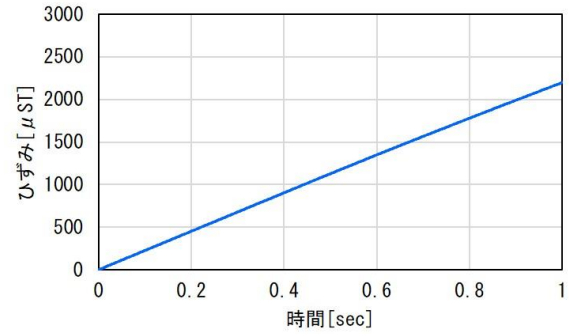


図 4 ひずみゲージによるひずみ測定結果 (引張試験)

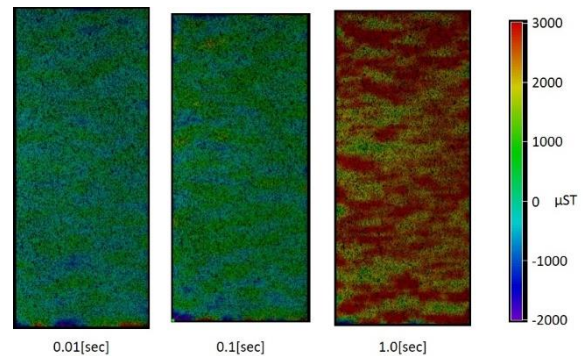


図 5 画像によるひずみ測定結果 (引張試験)

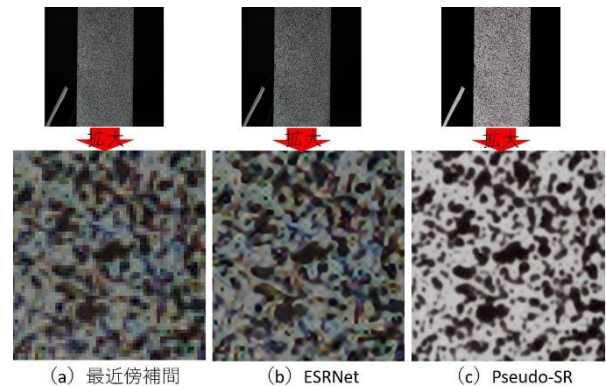


図 6 超解像処理結果 (引張試験)

最近傍補間法による拡大画像、ESRNet による超解像処理画像、Pseudo-SR による超解像処理画像を用いた画像によるひずみ測定結果を図 7 に示す。裏面のひずみゲージ貼り付け位置に相当する表面位置の 11 mm×11 mm の領域の平均ひずみ値は、最近傍補間による拡大 223 μ ST, ESRNet 214 μ ST, Pseudo-SR 227 μ ST である。この時のひずみゲージによるひずみは 227 μ ST であり、画像処理手法により差異の程度は異なり、Pseudo-SR ではひずみゲージによる測定と一致している。Pseudo-SR はランダムパターンの再現性が良く、変位を精度良く捉えることができたためと考えられる。

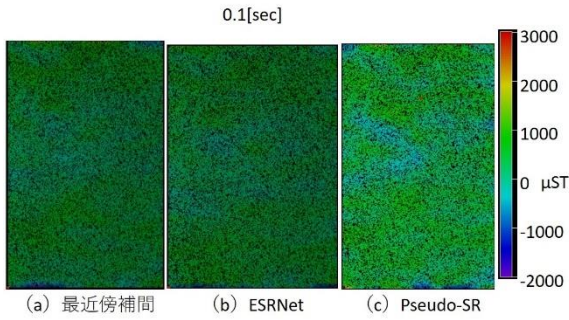


図7 超解像処理画像によるひずみ測定結果 (引張試験)

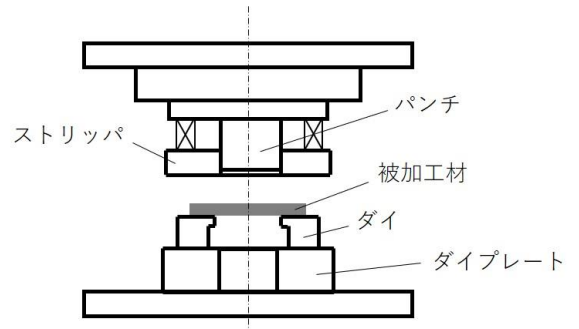


図9 金型構造模式図

3. プレス金型のひずみ測定

3.1 実験方法

サーボプレス (NC1-800 (D) 株式会社 アイダエンジニアリング製) を用いて、図8に示す形状の打抜き加工を行った。被加工材はSPCC (公称板厚 3.2 mm) を使い、金型の片側クリアランス 0.12 mm, 加工速度 30SPM の条件で加工した。金型構造の模式図を図9に示す。ひずみ測定を行うため、金型 (ダイ) の表面に3軸のひずみゲージ ($\phi 11$ mm) を貼り付けた後、白色のラッカースプレーを塗布し乾燥させ、黒色のラッカースプレーで大きさの異なる黒点のランダムパターンを作成した (図10)。

引張試験時と同じ装置を用いて金型表面を高速カメラにてフレームレート 5000 fps で撮影し、撮影した画像のうち最初の1枚と指定時間の2枚の画像をDIC法のソフトウェア (sDIC 西華デジタルイメージ株式会社製) により処理することで画像によるひずみ測定を行った。また同時に、金型表面のひずみゲージをデータロガーに接続し、サンプリングレート 5000 Hz でひずみを測定した。なお、高速カメラとデータロガーの測定開始は、サーボプレスのボルスタ下降を近接スイッチにて検知トリガ信号を両方に入力することで同期させた。実験環境を図11に示す。

超解像処理は、引張試験時と同様に学習済みの深層学習型モデルのアルゴリズム (ESRNet) と、事前撮影した高解像度画像により学習済みモデルを調整するアルゴリズム (Pseudo-SR) を用いて行った。また、超解像処理結果と元画像の比較を行うにあたり、画像サイズを揃えるため最近傍補間法により元画像を拡大した。

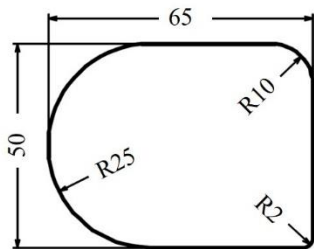


図8 打抜き形状

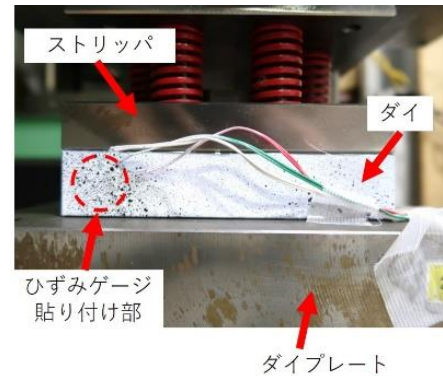


図10 ひずみゲージとランダムパターン (金型)

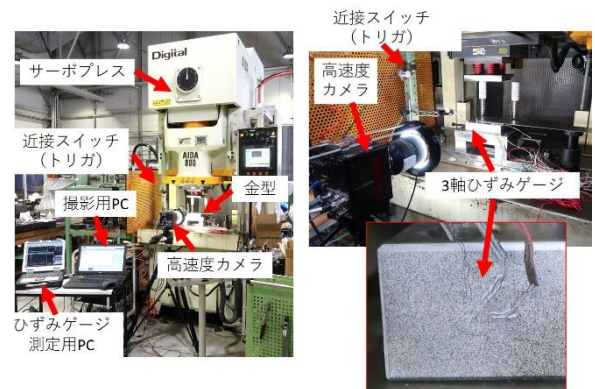


図11 実験環境 (プレス金型)

3.2 実験結果および考察

ひずみゲージによるプレス加工中の金型の水平方向のひずみ測定結果を図12に示す。加工時、水平方向に圧縮されていることがわかる。金型が拘束されている状態でダイに被加工材が押し込まれるため両側方向への応力が発生しているためと考えられる。

画像による金型の水平方向のひずみ測定結果を図13に示す。ひずみゲージ貼り付け位置に相当する場所の11 mm \times 11 mm の領域の平均ひずみは 40.3 μ ST となり、ひずみゲージによる測定値 -4.1 μ ST と大きな差異となっている。引張試験時と異なり複雑なひずみが発生していると考えられることから、ひずみゲージによる測定領域と画像による測定領域のずれが測定のずれにつながっ

たとえられる。また、金型表面ではなくひずみゲージの表面にランダムパターンを形成していることから、ひずみゲージの変形の影響を強く受けた可能性も考えられる。

金型画像への超解像処理結果を図 14 に示す。引張試験と同様に最近傍補間法による拡大した画像に対して、ESRNet, Pseudo-SR ともにランダムパターンの輪郭が明瞭となっている。また、ESRNet と Pseudo-SR を比較すると引張試験と同様に Pseudo-SR の方が白黒やランダムパターンが明瞭で再現性が高い。これらは、引張試験と同様に事前撮影した高解像度画像による学習済みモデルの調整が有効であったと考えられる。

最近傍補間法による拡大画像, ESRNet による超解像処理画像, Pseudo-SR による超解像処理画像を用いた画像によるひずみ測定結果を図 15 に示す。ひずみゲージ貼り付け位置に相当する場所の 11 mm×11mm の領域の平均ひずみは、最近傍補間法による拡大 53 μ ST, ESRNet 43 μ ST, Pseudo-SR 56 μ ST である。超解像処理によりひずみ測定精度は向上しているが、ひずみゲージとの差異が大きく、Pseudo-SR の効果は確認できていない。超解像処理前の画像によるひずみ測定においてもひずみゲージの測定との差異が大きいため、超解像処理の効果十分に発揮できていないと考えられる。ランダムパターンを金型表面に直接形成した実験による再検証が必要と思われる。

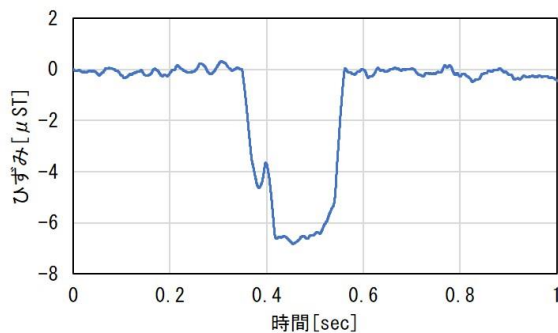


図 12 ひずみゲージによるひずみ測定結果 (金型)

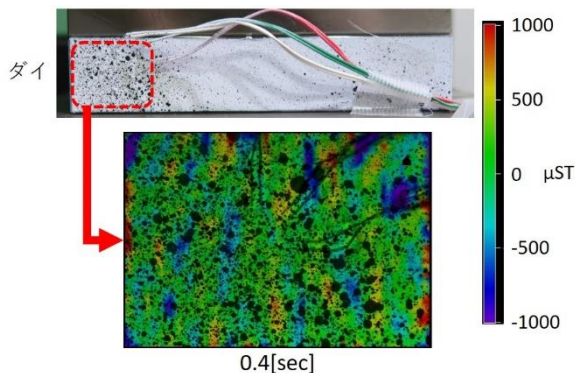


図 13 画像によるひずみ測定結果 (金型)

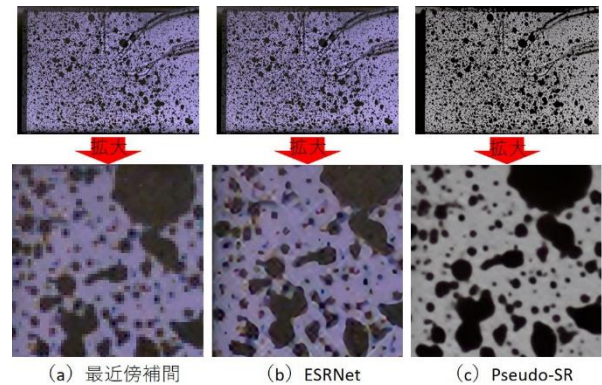


図 14 超解像処理結果 (金型)

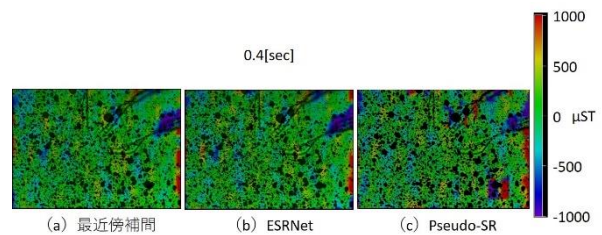


図 15 超解像処理画像によるひずみ測定結果 (金型)

4. まとめ

加工状態認識のための画像による非接触の金型ひずみ測定にあたり、微小時間で高精度なひずみ測定が可能な基礎技術の開発を目的として、低解像度画像から高解像度画像を再構成する超解像処理の有効性を評価した。詳細を以下に示す。

- (1) 引張試験を対象に、ひずみゲージによるひずみ測定と画像によるひずみ測定を行い、両手法の測定値を比較した結果、傾向は似ているものの差異があることがわかった。
- (2) 引張試験を対象に、ひずみ測定における超解像処理を評価した結果、事前撮影した高解像度画像により学習済みモデルを調整するアルゴリズムを用いることでひずみ測定精度が向上し、ひずみゲージによる測定値と一致した。
- (3) プレス加工中の金型を対象に、ひずみゲージによるひずみ測定と画像によるひずみ測定を行い、両手法の測定値を比較した結果、差異が大きかった。
- (4) プレス加工中の金型を対象に、ひずみ測定における超解像処理を評価した結果、ひずみゲージによる測定値との差異は大きく、超解像処理の有効性は確認できなかった。ランダムパターンを金型表面に直接形成した実験による再検証が必要と思われる。

以上のことから、対象により結果は異なったが、単純な変形において、超解像処理適用の有効性を確認することができた。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の2020年度一般研究助成事業（AF-2020010-B2）により実施したものであり、深甚なる謝意を表します。

本研究の遂行にあたり、北海道科学大学 和田直史准教授に多大な協力をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 萩野直人・遠藤順一・加藤俊二・石濱正男：塑性と加工, 826-830 (2013), 632.
- 2) S. Hao, S. Ramalingam and B. E. Klamecki : Journal of Materials Processing Technology, 124-136 (2000), 101.
- 3) B. Behrens, S. Hubner, and K. Wolki : Journal of Manufacturing Processes, 281-288 (2017), 29.
- 4) 小山純一・柳明：塑性と加工, 60-64 (2010), 596.
- 5) 田中正行・奥富正敏：映像情報メディア学会誌, 337-342 (2008), 62.
- 6) 畝田道雄・粘奥畑峻・石川憲一：日本機械学会論文集 (C編), 119-126 (2010), 76
- 7) X. Wang, et al.: “ESRGAN: Enhanced Super-Resolution Generative Adversarial Networks”, ECCV (2018)
<https://arxiv.org/abs/1809.00219>, <https://github.com/open-mmlab/mmediting>
- 8) Maeda. Shunta: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020.