

令和元年5月21日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06800

研究課題名(和文) レーザを用いた二軸引張応力場における極薄金属箔の表面あれ進展と破壊のその場観察

研究課題名(英文) In-situ observation with laser of surface roughening and fracture behaviors for thin-metal foils under bi-axial tensile state

研究代表者

古島 剛 (FURUSHIMA, Tsuyoshi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：30444938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、医療機器、電子デバイスなど多くの分野で微細部品を安価に高速生産する技術として、極薄金属箔を用いたマイクロ精密プレス成形に注目が集まっている。しかしながら、従来のマクロスケールにおけるプレス成形技術をそのままマイクロスケールに適用するのは“寸法効果”の観点から容易ではない。そこで本研究では極薄金属箔材の塑性変形中の結晶粒や表面形状レベルのミクロな視点と材料全体のひずみ分布をその場観察する小型マイクロ二軸引張試験機を開発した。開発した試験機を用いて、様々なひずみ状態の、表面あれ進展挙動と局所くびれの発生と破壊に至る過程を可視化することで、金属箔材の破壊メカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではミクロからマクロをカバーする金属箔の変形挙動を可視化することができる革新的な試験機を開発した。開発した試験機は、金属箔の表面性状の変化や破壊挙動を予測することが可能である。本研究成果によって、金属箔材を多く用いる医療機器や電子デバイス部品を安価に大量・高速生産する小さなプレス加工の高精度化に貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：In recent years, the micro metal forming with thin metal foils has been focused on for inexpensively and rapidly producing micro parts with low cost in various fields such as medical and electronic devices. However, it is not easy to apply conventional macro-scale metal forming technology to micro scale from the viewpoint of "size effect". In this study, we developed a small micro bi-axial tensile testing machine. In-situ observation of the strain distribution and the microscopic behavior of the viewpoint of the grain and surface shape level during plastic deformation for the thin-metal foils. The fracture mechanism of the metal foils was clarified by visualizing the surface roughening behavior and the process leading to the occurrence of local necking and fracture under various strain conditions using the developed testing machine.

研究分野：塑性工学

キーワード：表面あれ 破壊 その場観察 可視化 塑性変形

よび表面プロファイルの計測を行った。DIC 法によって得られたひずみ情報からひずみ比 $\alpha = \epsilon_2 / \epsilon_1$ を計測した。

供試材は板厚 50 μm の純銅箔 C1020R-O を用いた。Marciniak 法に基づき、張出し試験によって様々なひずみ状態を作り出すため試験片幅 $w=1, 7.8, 15\text{mm}$ を持つダンベル形状とした。ドライビングプレートは穴径 $d=2.38\text{mm}$ を有する微細粒ステンレス鋼を用いた。張出し用のパンチとの接触面にフッ素系潤滑剤を塗布した

4. 研究成果

(1) レーザスペckルパターンを利用したデジタル画像相関法によるひずみ分布測定の妥当性

単軸引張試験中の軸方向ひずみ分布のカラーコンター図を図 3 に示す。黒色のプロットは最大のひずみを示している箇所である。ストロークが 6.0mm 以降、同一の箇所にひずみが集中していることが分かる。この試験片の引張試験中の荷重は、ストロークが 6.0mm のときに最大に達している。荷重が最大に達した後にくびれが始まるという理論と照らし合わせると、計測結果が定性的に妥当性であると言える。また、Fig. 2 (b) の R 部付き試験片の軸方向ひずみ分布を図 4 に示す。従来の DIC 法と比較して、定性的に非常に一致している。以上の結果から、ひずみ分布の定性的な妥当性が確認できた。

R 部付き試験片のストローク 0.5~3.5mm のひずみ分布計測結果を図 5 に示す。実線は本計測法、破線はすすプレーパターンを用いた従来の DIC 法、プロットはストロークが 3.5mm のときの格子の変形を計測することで得られたひずみである。いずれのひずみも非常に良好な一致を示している。この結果から、本計測によって取得できるひずみ分布の定量的な妥当性が確認され、従来の DIC 法と同様に計測可能であることが明らかとなった。

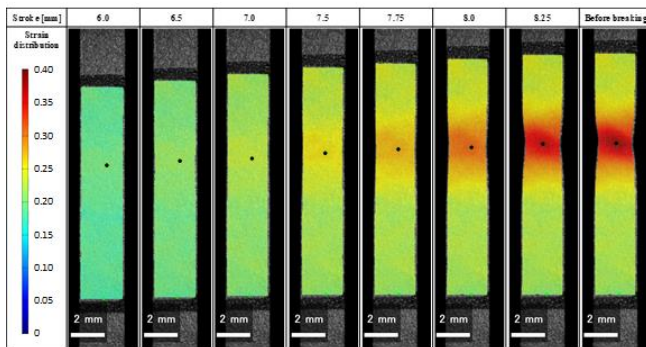


図 4 単軸引張応力状態におけるひずみ分布

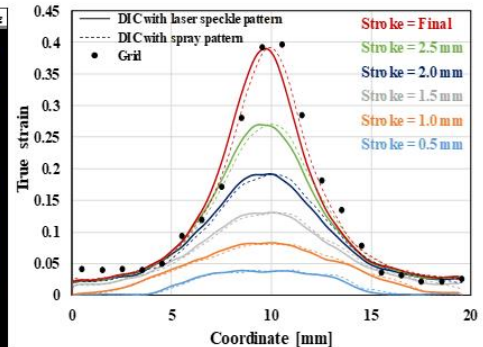


図 6 R 部付試験片のひずみ分布

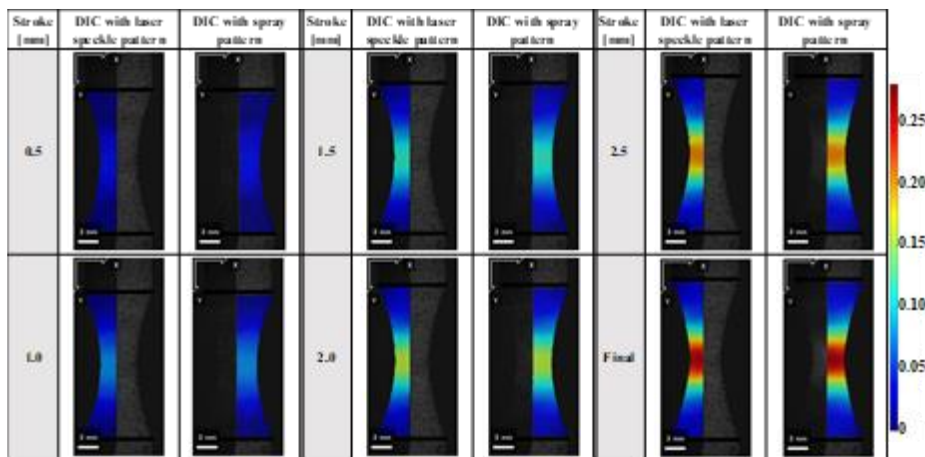


図 5 R 部付試験片のひずみ分布のコンター図

(2) その場観察用小型マイクロ二軸引張試験装置による表面あれ進展挙動の可視化

ひずみが集中し始める時点の評価するため、ISO 規格の方法により成形限界ひずみを測定した。純銅箔における結果を図 7 に示す。比較のため板材で一般に利用される Hill および Stören-Rice 理論による成形限界曲線を示している。どのひずみ状態においても、理論に比べ早期にひずみが集中し始めていることが分かる。

破壊に至るまでの変形挙動を調査するため、張出し部の面内ひずみ分布を測定した。図 8 は $w7.8$ (ひずみ比 $\alpha=0.15$) の純銅箔における結果を示している。ひずみは最大主ひずみ方向のオイラーひずみである。はじめ均一変形したのち、帯状にひずみが集中し、その地点で破壊した。他のひずみ状態 $w15$ ($\alpha=1.01$), $w1.0$ ($\alpha=0.53$) に

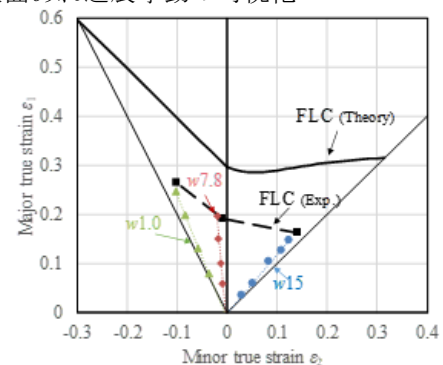


図 7 成形限界線図

においても同様の挙動が見られた。

破壊に至るまでの表面あれ進展挙動を観察するため、張出し部の表面プロファイルを取得した。図9は $w15\text{mm}$ ($\alpha=-1.01$)、 $w7.8\text{mm}$ ($\alpha=-0.15$)、 $w1.0\text{mm}$ ($\alpha=-0.53$)の純銅箔における局所くびれが発生するまでの表面プロファイルを示している。変形初期の段階で周囲より凹な部分が表れている。その後表面あれの進展とともに凹部も成長していく。 $w15\text{mm}$ の所圏では $\epsilon_{eq}=0.211$ 前後より凹部以外の領域はほぼ変化しなくなり、凹部のみが成長し始め、最終的に凹部で破壊に至った。以上の結果は、相当ひずみのレベルに違いはあれど、他のひずみ状態においても同様であった。従って、二軸引張りにおける金蔵箔材の局所くびれの発生メカニズムは、表面あれを起点とした凹部の局所成長によるものであることがわかる。この結果、ひずみの早期的な局所集中が観察されたと考えられる。凹部の発生には、箔材の潜在的な板厚不均一や板厚方向の結晶粒数の違い等の因子が影響していると考えられる。

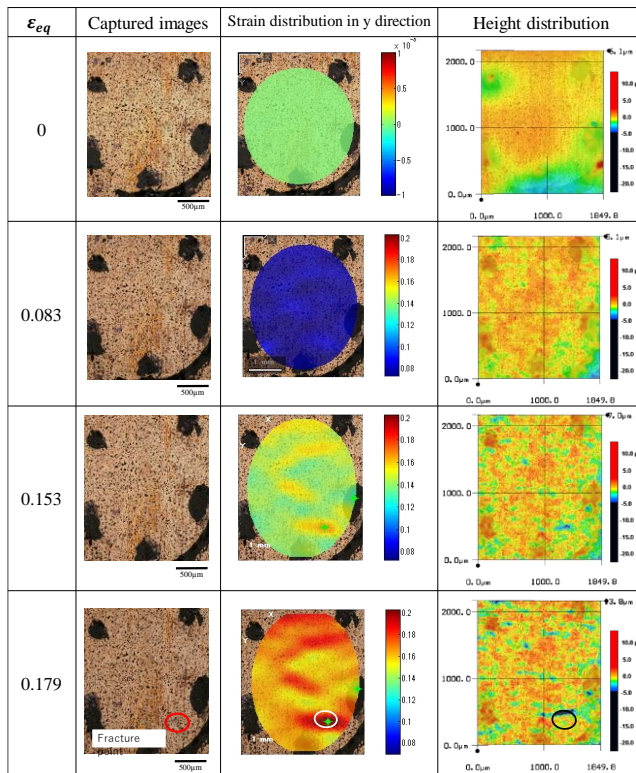


図8 ひずみ分布および表面プロファイル

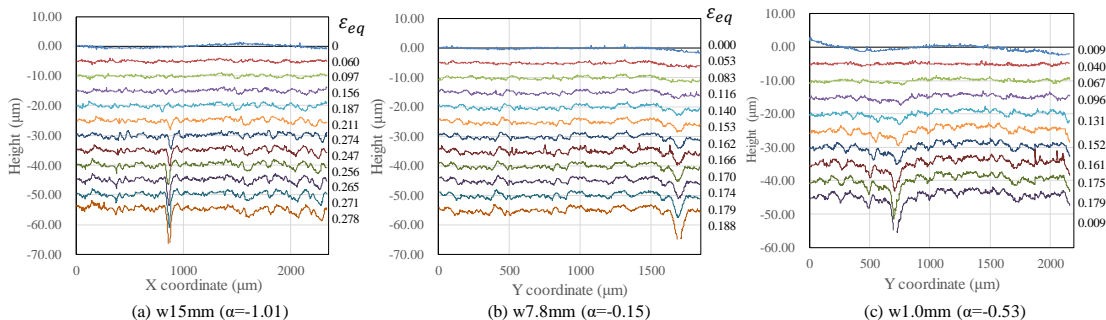
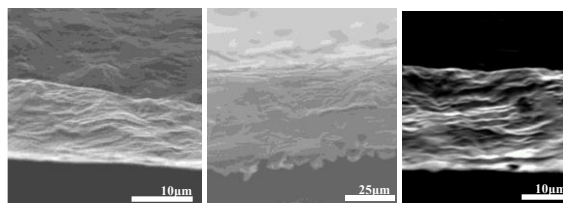


図9 各種ひずみ状態における表面プロファイルの進展

(3) 極薄金属箔材の二軸引張応力状態における破壊形態とその予測法の提案

金属箔材が破断した後の破断面を、SEMを用いて観察した結果を図10に示す。どのひずみ状態においても板厚の厚い板材の延性破壊で見られるディンプルが見られなかった。これらの結果から表面あれ起点による局所くびれの発生が破壊形態に影響を及ぼしていることもわかる。



(a) $w15\text{mm}$ ($\alpha=-1.01$) (b) $w7.8\text{mm}$ ($\alpha=-0.15$) (c) $w1.0\text{mm}$ ($\alpha=-0.53$)

図10 各種ひずみ状態における破断面

これまでの結果より、張出し部の最も凹な部分の深さを追跡することで、箔材の成形性を評価できる可能性がある。深さは最大谷深さ率 Rv/t を定義し評価した。ここに Rv は張出し部の最大谷深さ、 t はその変形時点における板厚を表し、張出し部の平均板厚ひずみから算出した。図11にその結果を示す。ひずみ状態を問わず、 Rv/t が明瞭に急増する点が存在することがわかる。この点は凹部が局所的に成長し始める時点と対応しており、箔材の成形限界とみなせる。この成形限界時の Rv/t と破壊直前の Rv/t がひずみ状態によらず、それぞれ一定の値を示していることがわかる。すなわち、板厚に対する表面粗さの割合が大きい金属箔材においては Rv/t が急増する点が、ひずみ状態によらず成形限界を決定づける因子である可能性が示唆できる。

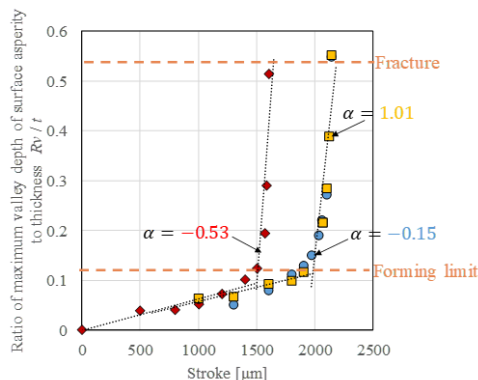


図11 最大谷深さによる破壊判定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- 1) N. Mashiwa, T. Furushima, K. Manabe: Novel Non-Contact Evaluation of Strain Distribution Using Digital Image Correlation with Laser Speckle Pattern of Low Carbon Steel Sheet, *Procedia Engineering*, Vol. 184 (2017) pp. 16-21, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.065> (査読あり)
- 2) T. Furushima, Y. Hirose, K. Tada, K. Manabe: Development of Compact Marchiniak Testing Apparatus for In-situ Microscopic Observation of Surface Roughening, *Procedia Engineering* Vol. 207 (2017) pp. 1946-1951., <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.966> (査読あり)
- 3) T. Furushima, Y. Hirose: Development of In-situ Observation Methods of Surface Roughening Behavior By Hand-size Stretching Test for Metal Foils, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1063, Conf. 1, (2018) 012130, doi :10.1088/1742-6596/1063/1/012130 (査読あり)
- 4) T. Furushima, H. Sato, K. Manabe, S. Alexandrov: Identification of an Empirical Equation for Predicting Free Surface Roughness Evolution in Thin Sheets of Aluminum Alloy and Pure Copper, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 140 (2018) 034501-1-6 (査読あり)
- 5) P. Knysh, K. Sasaki, T. Furushima, M. Knezevic, Y.P. Korkolis, Deformation-induced surface roughening of an Al-Mg alloy, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1063, Conf. 1, (2018) 012132, doi :10.1088/1742-6596/1063/1/012132 (査読あり)
- 6) T. Furushima, H. Tsunozaki, Y. Hirose: Fracture and surface roughening behaviors in micro metal forming, *Procedia Manufacturing*, Vol. 15 (2018), pp. 1481-1486., <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.331> (査読あり)
- 7) T. Furushima, K. Aoto, S. Alexandrov: A New Compression Test for Determining Free Surface Roughness Evolution in Thin Sheet Metals, *Metals*, Vol. 9, No. 4 (2019) 451, <https://doi.org/10.3390/met9040451> (査読あり)

〔学会発表〕(計 6 件)

- 1) 古島 剛, 真鍋 健一: 二軸引張応力状態における極薄金属箔材の局所くびれ発生に及ぼす自由表面あれ進展挙動のその場観察, 第 68 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2017) pp. 417-418
- 2) 佐々木 完太, Yannis P. Korkolis, 笥 幸次, 古島 剛: 単軸引張応力状態における結晶組織分析に基づく多結晶金属薄板の自由表面あれ挙動に関する実験的研究, 第 68 回塑性加工連合講演会講演論文集, (2017) pp. 423-424
- 3) Kanta SASAKI, Yannis P. Korkolis, Koji Kakehi, Tsuyoshi FURUSHIMA: Investigation of deformation-induced surface roughening based on microstructure analysis in polycrystalline metal sheets, The 10th Asian Workshop on Micro/Nano Forming Technology (AWMFT2017), (2017)
- 4) 古島 剛: MF-TOKYO2017 学会テクニカルセミナー「材料不均質性を考慮した微細精密プレス成形シミュレーションー蟻よりも小さなプレス成形の世界ー」(2017 年 7 月 15 日) (招待講演)
- 5) 古島剛, 増和尚輝: レーザスペckルパターンを応用したデジタル画像相関法による塑性ひずみ分布の完全非接触計測と可視化, 平成 30 年度塑性加工春季講演会講演論文集, (2018) pp.117-118.
- 6) 古島 剛, 廣瀬 雄太郎: ひずみ誘起自由表面あれ進展挙動の共焦点レーザ顕微鏡下その場観察装置の開発, 日本銅学会第 58 回講演大会講演概要集, (2018) pp.117-118

〔図書〕(計 1 件)

- 1) Sustainable Material Forming and Joining, Edited by R.Ganesh Narayanan, Jay S Gunasekera, CRC Press (ISBN 9781138060203 - CAT# K33308) (2019 年 2 月)分担執筆 (11. Some Recent Developments in Microforming 担当)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等: <https://www.furulab.iis.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：セルゲイ アレキサンドロフ

ローマ字氏名：Sergei Alexandrov

研究協力者氏名：ヤニス コッコリス

ローマ字氏名：Yannis Korkolis

研究協力者氏名：真鍋 健一

ローマ字氏名：Ken-ichi Manabe

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。