研究成果報告書 科学研究費助成事業

	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 roughenin thin-metal foils under bi-axial tensile state	ng and t	fracture	beha	vioı	s fo	r
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なちのも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 分布をその場観察する小型マイクロニ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明らかにした。 こズムを

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

様 式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)1.研究開始当初の背景

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.すなわち,従来のマクロスケールで用いられてきた連続体を前提と した塑性力学理論では,極薄金属箔の変形挙動を正確に表現することができず,高精度なマイ クロ精密プレス成形の実現を妨げている要因の一つになっている.以上のような背景から極薄 金属箔材の変形挙動を高精度に予測するためには,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やくびれの発生,破断挙動などマクロな視点の双方の変形 挙動の関連性を解明する必要がある.

2. 研究の目的

そこで本研究では、板厚 100µm 以下の超極薄板金属箔材の二軸引張応力状態における表面あ れ進展と破断挙動を直接その場観察することが可能なマイクロ二軸引張試験装置を開発する. 具体的には定量的な 3 次元表面プロファイルと高解像度の表面画像の取得可能なレーザ顕微鏡 下に、本研究で開発する小型のマイクロ二軸引張試験装置とレーザスペックルパターンを生じ させるレーザ照明を設置し、等二軸引張、平面ひずみ引張をはじめとする様々な二軸引張応力 下の塑性変形中の時々刻々の表面粗さをレーザ顕微鏡による 3D プロファイルを広視野にわた って高精度に測定する.また取得した高解像度のレーザスペックルパターンを有する表面画像 からデジタル画像相関法(DIC)を用いて完全非接触状態でひずみ分布や変形中の結晶粒一つ 一つの動きをリアルルタイムに測定する.特に試験機上で変形している領域すべての破壊に至 るまでの表面に関する表面プロファイル、粗さ、ひずみ等の表面に関するあらゆるデータを取 し、極薄金属箔の二軸引張応力下の結晶粒レベルの表面あれ進展と破壊メカニズムを明らかに する.また得られた知見をもとに結晶粒径や表面あれ進展をパラメータに導入した極薄金属箔 材の二軸引張応力下における破壊条件式を導出する.

3. 研究の方法

(1) レーザスペック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法

レーザスペックルパターンは、図1に示すようにレ ーザ光が物体の表面に照射された際、表面の微小な凹 凸によりランダムに散乱され、散乱光が互いに干渉す ることで観察されるランダムな斑点模様である.物体 の変形に伴い表面の凹凸は時々刻々と変化するが、レ ーザスペックルパターンは表面の凹凸を反映している ため、レーザスペックルパターンの変化は表面の変形 を表現していると考えられる.標点間距離21mmの単 軸引張試験片と半径24mmのR部を有する引張試験片 を用いて、引張試験中のひずみ分布計測を行った. クロスヘッド速度は単軸引張試験片において

1mm/min, R部付試験においては 0.5mm/min とし



図1 レーザスペックルパターン

た. 画像撮影間隔は 5.0s で試験を行った. 試験片表面の半分に従来の DIC 法で使用されるス プレーパターンを塗布, 裏面に 0.5mm 四方の格子を描くことで,本計測法,従来の DIC 法, 格子の変形の 3 手法でひずみ分布を取得した.

(2) その場観察用小型マイクロ二軸引張試験装置の開発

任意の二軸引張変形を受ける金属箔材の表面あれおよび延性破壊挙動をその場観察するため Marciniak 法に基づき小型二軸張出し試験機を開発した.その場観察用の小型張出し試験機は、 共焦点レーザ顕微鏡のステージ上に設置できるよう、小型かつ軽量に設計した.図2は金型お よび工具の構造を示す.金型・工具寸法は ISO 規格¹⁾を相似的に縮小して適用した.張出し部

と顕微鏡レンズとの距離を一定に保つ ため,本試験機では,パンチの代わりに ダイとブランクホルダーが下降し,試験 片を張出す機構となっている.

共焦点レーザ顕微鏡に設置された xy 電動ステージと画像連結機能により,張 出し中央部全域を高倍率レンズの高精 細な画像を一枚一枚繋ぎ合わせること により,微小な3次元的な表面あれプロ ファイルの変化を,広視野で取得するこ とを可能にしている.各ストロークで取 得した画像より,デジタル画像相関法 (DIC 法)を用いたひずみ分布の測定,お



図2 開発したその場観察用小型張出試験装置

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 $a=\epsilon_2/\epsilon_1$ を計測した.

供試材は板厚 50µm 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, 15mm 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=2.38mm 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) レーザスペック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,破線はすス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ニ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を評価するため, 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 a=-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(a=-1.01),w1.0(a=-0.53)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 w15mm (a=-1.01), w7.8mm (a=-0.15)w1.0mm (a=-0.53)の純銅箔におけ局 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. W15mm の所圏では *ε*_{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 違いがあれど,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.

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. 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.







5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- 1) N. Mashiwa, <u>T. Furushima</u>, 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) <u>T. Furushima</u>, 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) <u>T. Furushima</u>, 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) <u>T. Furushima</u>, 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, <u>T. Furushima</u>, 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) <u>T. Furushima</u>, H. Tsunezaki, 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) <u>T. Furushima</u>, 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)

- <u>古島</u>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
- 佐々木 完太, Yannis P. Korkolis, 第 幸次, <u>古島 剛</u>: 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
- Kanta SASAKI, Yannis P. Korkolis, Koji Kakehi, <u>Tsuyoshi FURUSHIMA</u>: 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: レーザスペック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) <u>古島</u>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〕 〇出願状況(計 0 件) 〇取得状況(計 0 件)

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

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。