

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03781

研究課題名（和文）変形双晶による力学的特異性を考慮したマグネシウム合金2Dセル状構造体の最適設計

研究課題名（英文）Optimal design of 2D cell type structure of magnesium alloys considering mechanical characteristics induced by deformation twins

研究代表者

清水 一郎 (Shimizu, Ichiro)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号：10263625

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、延性や剛性に乏しいマグネシウム合金の特異な力学的挙動を定量的に理解し、その知見に基づいて所望される機能を最大限に発現する2Dセル状構造体設計手法の確立を目指して実施した。AZ31マグネシウム合金を対象とし、塑性変形と成形限界の静水圧応力依存性や、集合組織が力学的特性に及ぼす影響について基盤となる知見を得た。続いて、2D単位セル形状評価に有用な、菱形試験片を用いた新たな引張り曲げ試験法を考案した。この試験法と有限要素法解析を援用することにより、変形能や剛性に優れた2Dセル形状の設計指針を得た。さらに、マグネシウム合金製2Dセルの応用としてオーセティック構造体への展開可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マグネシウム合金は軽量かつ高比強度で生体適合性に優れる一方、特定の方位関係で活動する変形双晶とも相まって延性や剛性に乏しい短所を有する。近年、その2Dセル状構造体には医療機器等への応用が期待されているが、所望機能を発現させるためのセル形状設計指針は未解明である。本研究では、2Dセル状構造体の定量評価を可能にする新たな試験法を提案し、有限要素法解析を援用して有用性を示した。また、その試験法を用いて力学的特性を向上させる設計指針を見出した。これらの成果は、マグネシウム合金製2Dセル状構造体の最適設計に寄与するとともに、社会的にはセル構造を活かした医療機器等の性能向上に貢献するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：The present work was performed to quantitatively understand the mechanical behavior of magnesium alloys having poor ductility and rigidity, and establish a design method for 2D cellular structures to maximize the characteristics of desired functions. First, the fundamental knowledge about the hydrostatic stress dependence of plastic deformation and forming limits, and the effect of texture on mechanical properties of AZ31 magnesium alloy. Next, a new tensile bending testing method using rhombus-shaped specimens was developed to evaluate the optimal shapes of 2D unit cell structure. By utilizing this testing method and the finite element method analysis, the design guidelines for 2D cell shapes with superior deformability and rigidity were obtained. Furthermore, the possibility for the application of magnesium alloy 2D cells to auxetic structures was demonstrated.

研究分野：材料力学，弾塑性工学，応用固体力学

キーワード：マグネシウム合金 2Dセル状構造体 塑性変形 機械材料 力学的性質 変形双晶 ひずみ勾配

1. 研究開始当初の背景

六方最密結晶構造を持つマグネシウム合金は、素材製造時に集合組織が形成される場合が多く、後続する塑性変形において、この集合組織と荷様式および荷方向が、すべり系や変形双晶の活動に少なからず影響し、特徴的な力学的挙動が現れる。主に圧延加工によって仕上げられるマグネシウム合金薄板材を素材とし、二次元的なセル形状が連続的に配列して構成される「マグネシウム合金製 2 Dセル状構造体」は、様々な分野での利用が期待されている。例えば医用分野では、マグネシウム合金が有する生体適合性や生体内分解性を活かし、生体吸収性ステント等への応用が進められている。ステントは通常、カテーテルにクリンプされ、患部到達時には塑性変形を受けて拡張留置される。このような構造体の機能を最大限に発揮させるためには、マグネシウム合金がもたらす特徴的な力学的挙動の影響を予測することが必要不可欠であるが、これまでにマグネシウム合金製 2 Dセル状構造体については研究例が乏しく、その設計指針はほとんど示されていない。

2. 研究の目的

このような背景から本研究では、マグネシウム合金における特徴的な力学的挙動に及ぼす各因子(組織状態や変形様式など)の影響を明確化することにより、所望される機能を最大限に発揮できるマグネシウム合金製 2 Dセル状構造体の設計手法を確立することを最終目的とした。具体的にはまず、マグネシウム合金における室温下での力学的挙動に対して、集合組織や変形様式が及ぼす影響を定量評価する。次に、作製したマグネシウム合金 2 Dセル状構造体における寸法形状が力学的性質に及ぼす影響を解明し、設計指針を明らかにする。それらの成果を基盤とし、実際にマグネシウム合金製 2 Dセル状構造体を作製して設計指針の妥当性を検証するとともに、有限要素法解析を援用し、マグネシウム合金製 2 Dセル状構造体の最適設計に寄与する手法の構築を目指す。以上の目的が達成されれば、所望される機能を最大限に発現可能なマグネシウム合金 2 Dセル状構造体開発に大きく貢献できると期待される。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、以下のような流れで研究を遂行した。

(1) 集合組織の異なる AZ31 マグネシウム合金を入手し、各種力学的試験を実施することにより、集合組織および変形様式が力学的挙動に及ぼす影響について基盤となる知見を得た。

(2) 2 Dセル状構造体への適用を前提とした AZ31 マグネシウム合金薄板材において、面内ひずみ勾配が力学的挙動に及ぼす影響を調べるため、新たに構造体ユニットセルの性能を評価可能な引張り曲げ試験法を考案した。弾塑性有限要素法解析を併用しつつ、設計パラメータを段階的に変えた試験片をレーザー加工によって作製し、引張り曲げ試験を行うことにより、各種設計パラメータが、2 Dセル構造における剛性や荷重 - 変位関係、応力(ひずみ)集中に及ぼす影響を調べた。また、顕微鏡観察により局所的なひずみ分布の評価を行った。さらに、単位セルを連続配置した構造体を作製し、その力学的性能評価により設計パラメータの選択指針について検証を行った。

(3) (2) の研究成果として得られた 2 Dセル状構造体の設計指針に基づき、新たな応用として負のポアソン比を発現可能なマグネシウム合金製オーセティック 2 Dセル構造体の設計を試みた。

4. 研究成果

以下に、本研究で得られた主な研究成果を示す。なお、各項目番号は「研究の方法」と対応させている。

(1) まず、集合組織が力学的性質に及ぼす影響を把握するため、比較的強い集合組織を有する AZ31 マグネシウム押し丸棒材に対して比例ひずみ経路 2 軸圧縮を実施した。なお、丸棒材の軸方向を z 方向、それに直交する 2 つの半径方向を x, y 方向とする。結果の一例として、成形限界時の最大せん断応力 τ_{max} と静水圧応力 σ_m を図 1 に示す。x 方向単軸圧縮 (-22.5deg) から等二軸圧縮(45deg)までは最大せん断応

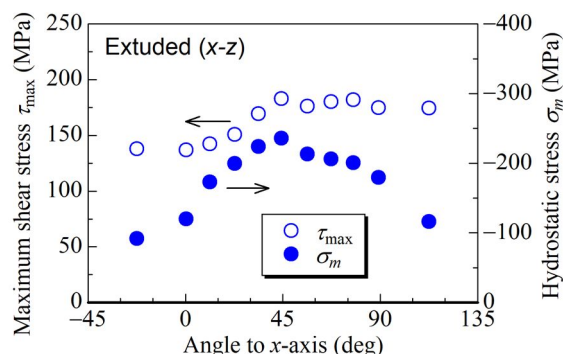


図 1 比例ひずみ経路における成形限界時の最大せん断応力と静水圧応力

力と静水圧応力ともに増加するが、等二軸圧縮から z 方向単軸圧縮 (112.5deg) に至る範囲では、静水圧応力は低下するものの最大せん断応力はほぼ一定となった。この結果は、 z 方向圧縮に近づくほど変形双晶の活動が顕著になり、それに伴う微細化硬化によって塑性異方向性が成長することを示している。すなわち、静水圧応力の増加は変形双晶の活動を抑制する方向に働くことを明らかにした。

続いて、圧延加工によって製造された板厚 0.5 mm の AZ31 マグネシウム合金板材と、押出加工によって製造された丸棒材から切り出した板厚 0.5 mm の AZ31 マグネシウム合金板材に対し、異なる方向の単軸引張り試験から得られた塑性仕事 - 塑性ひずみ関係を図 2 に示す。圧延材は延性回復のための熱処理によって集合組織が弱化しており、ほぼ等方的な挙動を示したが、破断ひずみは圧延垂直方向が優れていた。一方の押出材は、比較的強い集合組織により、変形双晶が活動しにくい方位である押出方向と、活動しやすい方位である押出垂直方向では明確に変形抵抗が異なった。なお、変形双晶活動の大小にかかわらず、塑性仕事 W と塑性ひずみ ϵ_p の関係は

$$W = a \{ \exp(b\epsilon_p) - 1 \}$$

の形で定式化できることを見出した。このことは、セル状構造体の最適設計に用いる構成関係を表現する際に極めて有用な知見となった。

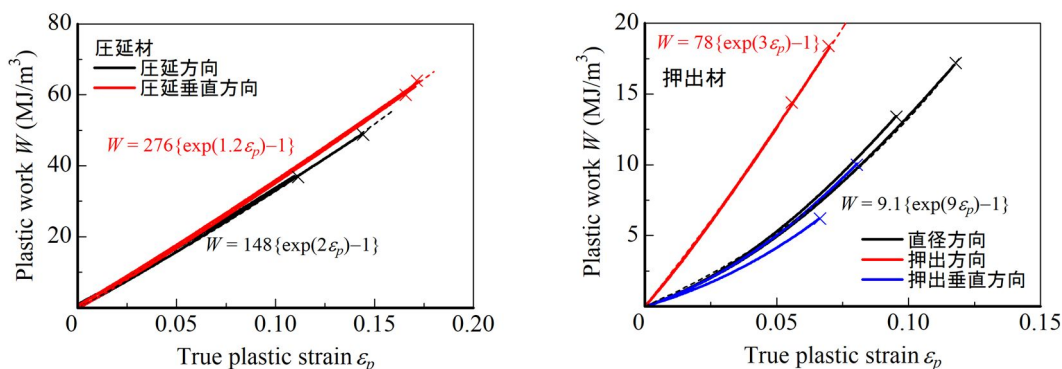
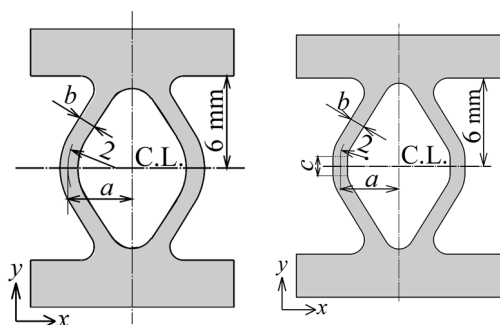


図 2 AZ31 マグネシウム合金板材の単軸引張りによる塑性仕事 - 塑性ひずみ関係

(2) AZ31 マグネシウム合金薄板試験片の形状を工夫することにより、単軸引張り時に面外変形をほとんど生じることなく、構造体ユニットセルの性能を評価可能な引張り曲げ試験方法を新たに開発した。塑性変形域まで試験可能であること、設計変更への対応が容易なこと、試験方法が比較的簡便であることの 3 条件を満たすことを前提に、考案した試験片形状を図 3 に、実際にレーザー加工によって作製した試験片の様子を図 4 に示す。試験片形状は直線部と曲率部で構成されており、以下ではこれらを「菱形試験片」と称する。この試験片に引張り変位 δ を与えることにより、対称部周辺に面内曲げを付与することが可能となった。2Dセル構造の設計パラメータとしては、図 4 に示すように中央部半幅 a 、ストラット幅 b 、中央直線部長さ c を設定した。以下では、菱形試験片を表す RS に続いて、各設計パラメータの値を並べた名称で試験片を区別する。例えば、中央部半幅 $a = 4$ mm、ストラット幅 $b = 1$ mm、中央直線部長さ $c = 1$ mm であれば、試験片名を「RSa4b1c1」と称する。菱形試験片における応力分布およびひずみ分布を調べるために、弾塑性有限要素法解析も併用した。



(a) 直線部なし (b) 直線部あり

図 3 菱形試験片 (C.L.は対称線)

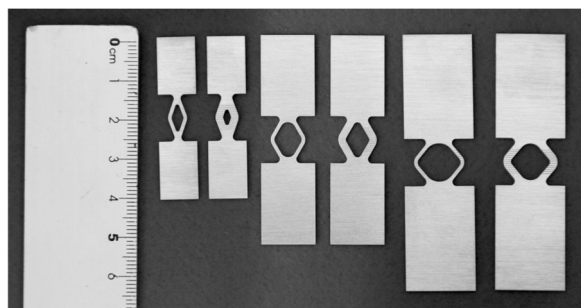


図 4 AZ31 マグネシウム合金製菱形試験片

菱形試験片における試験片曲率部の引張り方向ひずみ分布の一例として、直線部を持たない試験片 RSa4b1 について、引張り変位 $\delta = 0.3, 0.5, 0.8$ mm の際の結果を図 5 に示す。実験結果 (Expn.) と有限要素法解析結果 (Anal.) はほぼ一致しており、引張り方向ひずみは、曲率部内側では引張

り (+) で、曲率部外側に向かってほぼ直線的に減少して圧縮 (-) に転ずることがわかった。引張り変位 δ が増加すると、ひずみ勾配は徐々に大きくなる一方、引張りから圧縮に転ずる位置は引張り変位が増加してもほとんど変わらなかった。すなわち、直線部と曲率部から構成される菱形試験片では、曲率部において、引張りから圧縮に転ずる位置を中心として回転するような曲げ変形が生じることが確かめられた。次に、同試験片形状に対する有限要素法解析によって求めた曲率部付近のひずみ分布を図6に示す。曲率部全域で、内側から外側に向かってひずみ勾配が現れ、それが引張り変位に伴って成長する様子が観察された。その一方で、ひずみ勾配は中心線上で最も顕著であり、中心線から離れるにしたがって徐々にひずみ勾配は小さくなった。すなわち、ひずみ勾配は引張り軸方向にも現れることがわかった。この引張り方向のひずみ勾配は、中心線上内側でのひずみ集中を招き、破壊基点になり得ることから、変形能の観点からは望ましくないと考えられる。

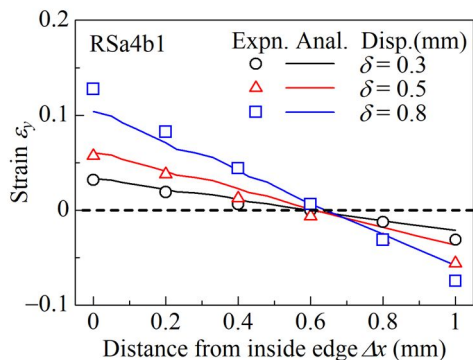


図5 菱形試験片における対称線近傍の引張り方向ひずみ分布

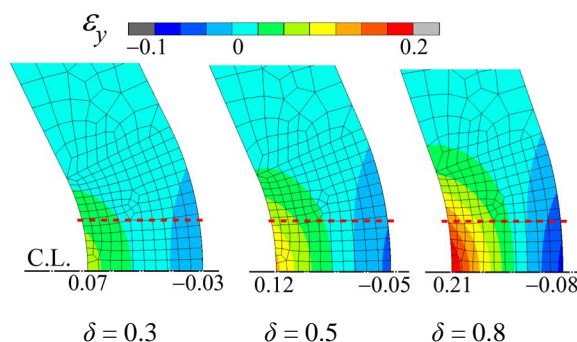


図6 菱形試験片曲率部近傍の有限要素法解析による引張り方向ひずみ分布

そこで新たに、曲率部に直線部を付与することによって応力集中の低減を図った。用いた AZ31 マグネシウム合金において、破壊開始が予測されるダメージ値に達する限界引張り変位を有限要素法解析によって求め、中央直線部長さに対してプロットした結果を図7に示す。中央直線部がない場合と比較して、中央直線部を設けることにより限界引張り変位が増加するが、さらに中央直線部が長くなると、限界引張り変位は一定値に近づくか、または減少する傾向が認められた。この理由を明確にするために、中央部半幅 $a = 4$ mm において最大ダメージ値に達した際の、試験片形状とダメージ値の分布を図8に示す。これらの結果から、ダメージ値が最大となる箇所は常に曲率部の内側であり、中央直線部が長くなりすぎると、その位置は中心線から離れ、それに伴ってひずみが再び曲率部に集中するようになり、結果として変形能を低下させるように働くことがわかった。

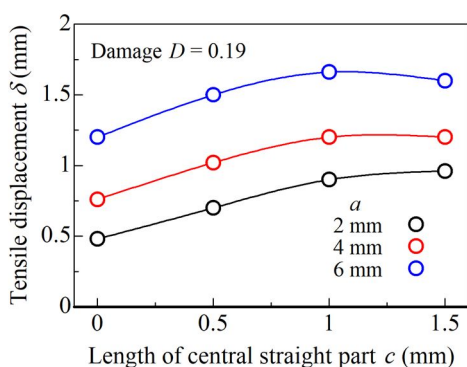


図7 菱形試験片における直線部長さに伴う破壊時引張り変位の変化

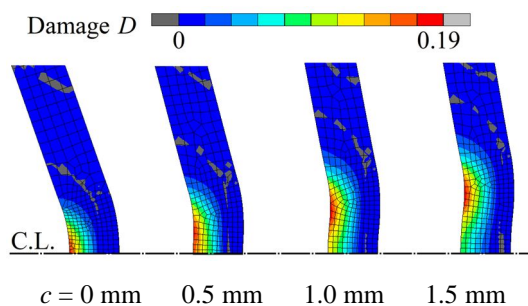
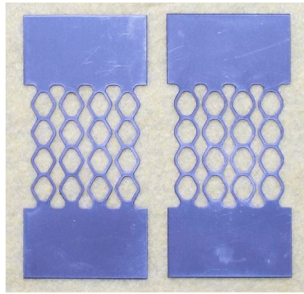


図8 直線部を付与した菱形試験片における引張り時のダメージ分布

以上に示した菱形試験片の引張り曲げ試験による単位セル形状の検討結果に基づき、単位セルを複数個連ねた AZ31 マグネシウム合金製 2 D セル構造体を作製し、引張り試験に伴う力学的挙動を調べた。実際に作製したセル構造体を図9に、引張り試験によって得られた荷重 - 変位関係を図10に示す。なお、セル半幅は $a = 4$ mm、ストラット幅は $b = 1$ mm とし、図9左側は直線部なし、図9右側は長さ 1 mm の直線部を付与している。破断まで単軸引張りを行った際の荷重 - 変位関係を比較すると、直線部なしに対して、 $c = 1$ mm の直線部を設けることにより、最大引張り荷重が約 1.5 倍、最大伸びが 1.2 倍に向上することが確かめられた。



左：直線部なし (RSa4b1c0)
 右：直線部あり (RSa4b1c1)

図9 AZ31 マグネシウム合金製
 2 Dセル構造体

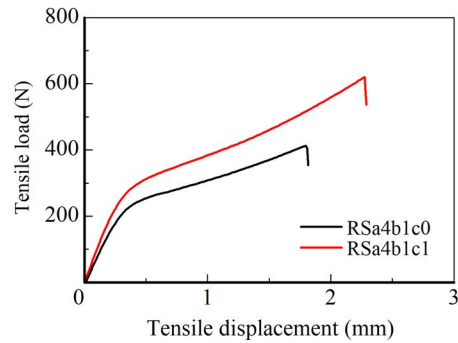


図10 セル構造体の引張り荷重 - 変位関係

以上の結果をまとめると、菱形試験片を用いた新しい引張曲げ試験法の導入により、座屈を生じることなく圧縮領域を含む直線的なひずみ勾配を得ることが可能となった。その成果として、セル幅と曲率の関係が構造体の剛性に影響を及ぼすこと、曲率部に適切な長さの直線部を設けることによって応力(ひずみ)集中が低減され塑性変形能が大きく向上すること、一方で直線部長さが適切な範囲を超えると曲率反転などの新たな問題が生じて変形能が低下することなど、単位セル形状の最適設計に極めて有益な知見を蓄積することができた。また、実験と解析によるマグネシウム合金製セル状構造体の形状最適化を試み、延性に乏しいマグネシウム合金で、変形能向上と強度増加の両立を可能にするセル形状を見出すことができた。これらの成果は、生体吸収性ステントをはじめとしたマグネシウム合金製2Dセル構造の設計に大きく寄与するものと位置付けられる。

(3)(2)までに得られた研究成果に基づき、2Dセル構造の更なる応用として、負のポアソン比を示すオーセティック2Dセル構造体の設計を試みた。有限要素法解析を援用し、延性に乏しいマグネシウム合金に対して、破断させることなくオーセティック機能を最大限に発現可能なセル形状を検討した。結果の一例を図11に示す。設計したセル形状に対し、左右方向の引張り変位を与えると上下方向にも広がり、負のポアソン比が実現できることが確かめられた。この例では、直線部および曲率部の寸法形状を適切に選択することにより、AZ31 マグネシウム合金が破断しない変形範囲で、最大拡張46%、最小ポアソン比-1.5の実現が可能となった。現在、このようなオーセティック2Dセル構造体を、医療機器や締結要素などの様々な用途へ展開するべく研究を継続している。

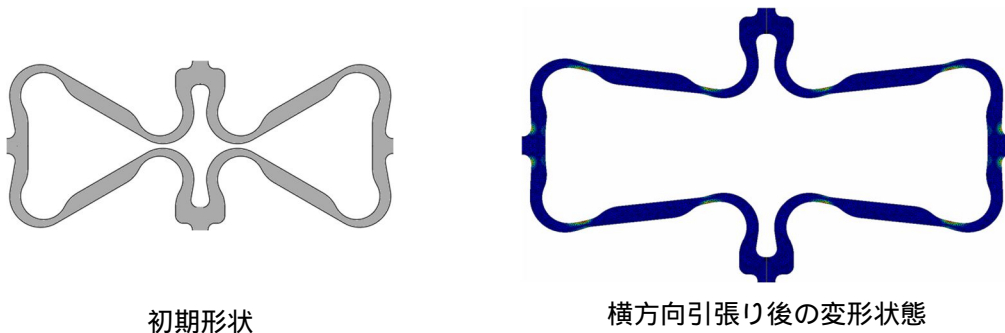


図11 オーセティック2Dセル構造体(最大拡張46%、最小ポアソン比-1.5)

以上のように、本研究はほぼ順調に進行し、目標としていた主要な成果を得るに至った。得られた多くの成果が、マグネシウム合金2Dセル構造体の設計指針として、医療分野をはじめとする様々な分野での実用化に繋がることを期待している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ichiro Shimizu, Shunpei Ueda, Akira Wada, Tomoya Kagotani and Yoshito Takemoto	4. 巻 8
2. 論文標題 Testing Method and Design Guideline of Unit Cell Shape of Cellular Structures Made of AZ31 Magnesium Alloy Considering Application to Coronary Stent	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Advanced Experimental Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11395/aem.24-0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 植田隼平, 清水一郎, 瀬古智貴
2. 発表標題 AZ31マグネシウム合金薄板の引張曲げに伴うひずみ勾配制御のための試験片形状設計
3. 学会等名 日本実験力学会2022年度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植田隼平, 清水一郎, 和田 晃
2. 発表標題 マグネシウム合金製ステント設計のためのひずみ勾配を伴う面内曲げ試験法の開発
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部第52回若手フォーラム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水一郎, 植田隼平, 和田 晃, 竹元嘉利
2. 発表標題 AZ31マグネシウム合金製2次元薄板構造の力学的評価用菱形試験片形状がひずみ勾配に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水一郎
2. 発表標題 AZ31マグネシウム合金における圧縮塑性変形特性と成形限界の静水圧応力依存性に関する検討
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 第52回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植田隼平, 清水一郎, 岡田拓真
2. 発表標題 引張曲げによるAZ31マグネシウム合金のひずみ勾配を伴う塑性変形挙動評価法の基礎的検討
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第60期総会・講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水一郎, 和田 晃
2. 発表標題 材料の力学的特性を考慮した2Dセル構造体の設計指針に関する一考察
3. 学会等名 日本実験力学学会2023年度年次講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoya Kagotani, Ichiro Shimizu, Shunpei Ueda and Akira Wada
2. 発表標題 Evaluation of In-Plane Bending Behavior in Thin Plate Cell Structure of AZ31 Magnesium Alloy for Application to Stent
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Experimental Mechanics for Students and Young Researchers 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡本 凌, 清水一郎, 和田 晃
2. 発表標題 バルーン拡張型マグネシウム合金製ステントのセル形状最適化に関する解析的検討
3. 学会等名 日本鉄鋼協会中国四国支部第55回若手フォーラム
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹元 嘉利 (Takemoto Yoshito) (60216942)	岡山大学・自然科学学域・准教授 (15301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------