

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K22037

研究課題名（和文）金属系オーセチック材料の実用可能性評価

研究課題名（英文）Evaluation of auxetic property in metallic alloy

研究代表者

貝沼 亮介（KAINUMA, Ryosuke）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：20202004

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：理論計算によると、負のポアソン比を示すオーセチック特性は、多くのbcc系金属間化合物でその存在が予測されていた。本研究では、加工熱処理により<110>集合組織を付与したCuAlMn基ホイスラー合金を繰り返し熱処理によって単結晶化した上で、この特異な特性を調査した。得られた単結晶を用い[110]方向に歪を与えながら垂直方位の弾性特性を調査したところ、[1-10]方位においてオーセチック特性を見出し[001]方位ではポアソン比が1を越えることも分かった。またこれらの特性は圧延集合組織においても得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、FeGa以外では実証されていなかった規則bcc金属間化合物（IMC）に出現する負のポアソン比について、CuAlMnにおいてもLD<110>に対しTD<1-10>方向において理論通り生じることを証明し、その起源は弾性定数C'が異常に小さいことにあることを示した。以上の結果から、他の規則bcc-IMCにおおても同様の現象が得られる可能性が十分にあることを示した。また、本現象は単結晶だけでなく多結晶でも得られることから、差し込むことで抜くことが難しい機械ダイオードといった機能性部材への応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：According to some theoretical studies, auxetic property, i.e., negative Poisson's ratio, is predicted in many bcc-based Intermetallic Compounds (IMCs). In the present study, some CuAlMn single crystals obtained by cyclic heat treatment from LD<110> texture samples were investigated to prove the peculiar property. By application of tensile stress to LD[110], the negative Poisson's ratio was confirmed in [1-10] direction, which was consistent with the theoretical results predicted with the moduli experimentally obtained. Furthermore, in [001] direction, a large Poisson's ratio over 1.0 was detected. These properties were also obtained in the {001}<110> textured polycrystalline sample fabricated by cold rolling and annealing. This means that the properties are available to functional devices such as mechanical diode.

研究分野：工学

キーワード：CuAlMn系合金 オーセチック特性 形状記憶特性 異常粒成長 単結晶

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

通常物質は、引張応力に対し垂直な方向では縮む正のポアソン比を示すが、一部のポリマー繊維を始めとしたオーセチック材料では、垂直方向が膨らむ負のポアソン比を示すことが知られている。オーセチック特性は、異方性はあるもののB2型金属間化合物 (IMC) 単結晶でも生じることが第一原理計算により予測されておりFeGaで実験的にも証明されている。今後、強度と靱性を具備したIMC単結晶が安価に得られるなら、一度挿入すると外れにくい機械ダイオードといった新しい機能を有するデバイスへの応用が可能となる。しかし、この特性は単結晶においてのみ可能かことから実用への検討はされてこなかった。

2. 研究の目的

最近、CuAlMn系形状記憶合金において、高温 単相域と低温 + 2相域間の熱サイクルを繰り返すだけで異常粒成長現象が発現することを見出し、通常多結晶棒材から70cmもの巨大な単結晶棒を作製することに成功した。本現象は、製造コストや形状の自由度など実用的な優位性が高いが、本手法で得られた単結晶には原理的に多量の亜粒界組織が残留するため、理論通りのオーセチック特性が得られる保証はない。また、成長する結晶粒を予め選ぶことは出来ないため、集合組織を利用することで結晶方位を制御する必要がある。

本研究では、既に異常粒成長に関して研究実績のあるCuAlMn合金を対象に、 $\langle 110 \rangle$ 集合組織を形成するための加工熱処理条件や、単結晶を効率的に得るためのサイクル熱処理条件を明確にする。さらに得られた単結晶について、歪みゲージを利用してオーセチック特性を評価し、実用材としての適用可能性を検討する。

3. 研究の方法

本研究では、冷間溝ロールや線引加工による加工熱処理を利用した棒 (線) 材の集合組織強化、サイクル熱処理法を用いた効率的な単結晶化、負のポアソン比 (オーセチック特性) の実測、共振法による弾性定数の実測を通して、工業的に量産化が見込めるCuAlMn系オーセチック材料の基本特性を評価し、実用材としての適用可能性を検討する。

(1) 集合組織の制御: CuAlMn合金では、冷間溝ロールおよび線引加工により圧延方位RD $\langle 110 \rangle$ もしくは線引方位DD $\langle 110 \rangle$ 集合組織が得られる。方位のずれは特性のバラツキとなるため、RD (DD) $\langle 110 \rangle$ への集積度をより高める加工熱処理法 (冷間加工度と焼鈍温度の最適化) を調査する。

(2) 単結晶化熱処理: 既に、無集合組織材では超巨大結晶粒が得られることが分かっている。そこで、(1)で得られた集合組織材においてもサイクル熱処理法を用いることで同様の異常粒成長が生じるかを調査する。また、変形方位LD $\langle 110 \rangle$ から10°以内の単結晶が歩留まり良く製造できるサイクル熱処理法を決定する。

(3) オーセチック特性の評価: (2)で得られた単結晶試料から様々な方向の板材およびブロック材を切り出し、引張および圧縮試験で歪みゲージによりオーセチック特性を調査する。この時、LD $\langle 110 \rangle$ からの結晶方位のずれが、特性にどの程度の影響を与えるか定量的に明確化する。

(4) 弾性定数の測定: サイクル熱処理法により得たCuAlMn単結晶について共振法を用いて各種弾性定数を調べ、理論ポアソン比を算出する。また、その結果と3.で歪みゲージにより得られた実測値を比較して考察する。この時、もし理論と実験値の差が大きい場合には、走査電子

顕微鏡を用いてサブグレイン組織を観察し、サブグレイン組織の有無による弾性特性への影響を明らかにする。

(5) 用途と製造コストの検討：機能性ファスナーに関して、どのような形態が実用化に最も適するののかについて検討する。

4. 研究成果

CuAlMn 合金を対象にした本プロジェクトにより以下の成果が得られた。

- (1) 集合組織の制御：CuAlMn 合金において冷間溝ロールおよび線引き加工により予想通り $\langle 110 \rangle$ 集合組織が得られた。また、加工度を大きくすることで方位のずれは $\langle 110 \rangle$ への集積度を 10° 以内に高められることが判明した。
- (2) 単結晶熱処理：(1)で得られた集合組織材においても同様の異常粒成長が生じるかを調査し、種々の熱処理を試みた。その結果、集合組織からLD $\langle 110 \rangle$ (10%以内)単結晶が歩留まり良く得られる条件を明らかにした。
- (3) オーセチック特性：(2)で得られた単結晶試料から様々な方向の板材を切り出し、引張試験で歪ゲージによりオーセチック特性を調査した。LD[110]に近い方位での特性について定量的な調査をしたところ、LD[110]に対し垂直関係にあるTD[1-10]、TD[1-11]、TD[001]において、それぞれほぼ理論通りのポアソン比の異常が確認できた。この中で、特にTD[1-11]についてはポアソン比がほぼゼロとなること、またTD[001]においてはポアソン比が1を越えることが新たに明らかとなった。
- (4) 弾性定数の測定：CuAlMn 単結晶について共振法を用いて各種弾性定数を調べ、理論ポアソン比を算出した。また、歪ゲージにより得られた実測値や理論計算と比較してその様な異常な特性の起源を考察した。その結果、負のポアソン比は、 $C' = (C_{11} - C_{12})/2$ が非常に小さく結晶異方性定数Aが大きな場合に生じることがわかった。また、理論と実験値は良い一致を示し、サブグレインの存在はあまり影響しないことが判明した。
- (5) 用途と製造コストの検討：製造コストの削減を考え、圧延加工を利用した再結晶集合組織による負のポアソン比材料について検討した。その結果、加工熱処理を工夫することにより $\{1-12\} \langle 110 \rangle$ もしくは $\{001\} \langle 110 \rangle$ 集合組織が得られ、多結晶試料でも集合組織によるTD方向のポアソン比制御が可能であることが分かった。 $\{001\} \langle 110 \rangle$ 集合組織材を用い差し込みは簡単だが抜くことができないといった機械ダイオード（機能性ファスナー）に関して、実用化に最も適する形態について検討した。

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 0件）

1. 著者名 Sheng Xu, Ryota Tsukuda, Mi Zhao, Xiao Xu, Toshihiro Omori, Kyosuke Yoshimi, Ryosuke Kainuma	4. 巻 177
2. 論文標題 Negative Poisson's ratio in Heusler-type Cu-Al-Mn shape memory alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 74-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scriptamat.2019.10.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 許勝, 許焜, 大森俊洋, 貝沼亮介
2. 発表標題 集合組織制御したCu-Al-Mn基合金におけるオーセチック特性
3. 学会等名 (公社) 日本金属学会2020年春期(第166回)講演大会(新型コロナウイルスで中止となったためアブストラクト上で発表)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sheng Xu, Xiao Xu, Toshihiro Omori, Ryosuke Kainuma
2. 発表標題 Orientation-designed large single-crystal Cu-Al-Mn alloys by abnormal grain growth and their enhanced functional properties
3. 学会等名 TMS 2021 virtual meeting conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------