

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23860018

研究課題名（和文）MRI アーチファクトを防止する生体用非磁性複合線材の創製

研究課題名（英文）Development of non-magnetic composite wire materials for preventing artifacts in MRI

研究代表者

蘇 亜拉図（SU YALATU）

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：80611532

研究成果の概要（和文）：

本研究では、磁気共鳴法による画像診断（MRI）において、アーチファクト（虚像）を発生しない生体用非磁性複合線材の開発を行った。常磁性体（Zr）と反磁性体（Ag）の複合化による線材の作製を試み、磁氣的性質および機械的性質を検討した。作製した Zr/Ag 複合線材は、現在医療用金属として使用されている中でも低磁化率である Ti の約 1/10 まで磁化率が低減し、MR 撮像においてもアーチファクト体積を低減したことから、MRI アーチファクト防止型新規医療用線材への応用が期待できる材料であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

This research developed of non-magnetic composite wire materials for preventing artifacts in Magnetic resonance imaging (MRI). The magnetic susceptibility and mechanical property of the composite wire with paramagnetic Zr and diamagnetic Ag were evaluated. The magnetic susceptibility of Zr/Ag composite wire noted almost 10% that of Ti, the artifact of MR image of Zr/Ag composite wire was decreased than Ti. Thus these Zr/Ag composite wire materials are useful for medical devices under MRI.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造・機能材料

キーワード：生体用非磁性材料、MRI アーチファクト防止材料、Zr/Ag 複合材料、Zr 基合金、低磁化率、線材加工、機械的特性、生体材料

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) 医療用の画像診断装置として、核気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging; MRI) が普及している。
- (2) 体内に脳動脈瘤クリップ、人工関節や人工歯根等の金属製インプラントが使用されている場合、金属周辺の画像にアーチファクト (実際の物体の画像ではなく、二次的に発生した画像) が生じることが問題となっている。
- (3) アーチファクトは、MRI スキャナから発生する磁場 (1.5T 程度) により、金属が磁化されて磁場を発生し、生体組織内の磁場の不均一を引き起こすことが原因である。すなわち、アーチファクト形成の重要なパラメータは、金属の磁化率と MRI スキャナが使用する印加磁場の大きさであると言える。
  - ① 印加磁場に関しては、詳細な MRI 診断を行うために高磁場 (3T) が必要とされており、印加磁場は増大する傾向にある。撮像パラメータの最適化によりアーチファクトの低減が図られてはいるが、高磁場化によるアーチファクトの増大は必至である。
  - ② アーチファクトを本質的になくすために、磁場との相互作用を持たない、磁化率ゼロに近い生体用金属材料の開発する必要性がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、磁気共鳴法による画像診断 (MRI) において、アーチファクト (虚像) を発生しない生体用非磁性複合線材の開発を行う。現行の金属製インプラントは、MRI が使用する強磁場によりアーチファクト発生を引き起こし、診断に支障をきたしている。アーチファクトの発生は金属が有する高い磁化率に起因するため、本問題の解決には金属の磁化率をゼロに近づける必要性がある。申請者はこれまでに Zr-Mo 合金の相構成を制御することにより、磁化率をチタン合金の 3 分の 1 まで低減できることを示した。この Zr および Zr-Mo 合金に反磁性材料 (Ag) を複合化させることにより、アーチファクトを発生しない磁化率ゼロを有する生体用非磁性複合線材の開発を目指す。本研究は、合金化による低磁性化に加え、反磁性材料との複合化により低磁性化を推進する点に特徴がある。得られる研究成果は MRI に対応する新規生体用非磁性複合材料として、整形外科領域や脳外科領域に大きく貢献する。

## 3. 研究の方法

### (1) Zr/Ag 複合材料の作製

吸引式水冷銅鑄型を備えたアルゴンアーク溶解装置を用いて Zr および Zr-Mo 合金を溶解し、直径 5mm、長さ 60mm の円柱を鑄造する。この円柱に対して、直径 1 - 4mm の中空パイプを作成する。中空部に直径 1-4mm、長さ 60mm の Ag ワイヤを挿入することにより、Zr/Ag 複合材料を作製する。

### (2) Zr/Ag 複合材料の線材化と磁化率の関係

(1)にて作製した Zr/Ag 複合材料を、線材加工機により線材加工を行う。線材加工に際し、直径を急減に低下させると材料が破壊する恐れがあるため、減面率を小さくして徐々に線材化を進めていく。直径 3mm まで加工した後、磁化率の測定を行う。これは保有する磁化率測定装置が測定できる最大径が 3mm であるためである。この結果から、Zr-Mo/Ag 複合線材の磁化率におよぼす Ag の影響を定量的に調べ、磁化率ゼロとなる Ag の割合を実験的に探求する。Zr および Ag の磁化率から複合則により予測できる値との比較検討を行う。

### (3) Zr/Ag 複合線材の細線化と磁化率におよぼす加工の影響

(2)にて作製した Zr/Ag 複合材料の細線化を進め、直径 1mm の線材化を目指す。直径 1mm の線材は脳動脈瘤クリップに使用する線材の直径に相当する。線材加工を進めるにつれて材料内に大量の双晶や転位が導入され、集合組織を形成することが予想される。これらは Zr/Ag 複合線材における、加工と磁化率の変化について、組織変化の観点から X線回折装置を用いて詳細に調べていく。

### (4) Zr/Ag 複合線材の MRI アーチファクト測定

磁化率ゼロ近傍の複合線材に対し、MRI によるアーチファクト測定を実施する。MRI 測定に供する試料の形状は直径 1. mm、長さ 30mm として全てを統一する。この線材を寒天培地の中に設置する。印加磁場は、3T とする。MRI 画像からアーチファクトの三次元画像を構築し、アーチファクトの体積を計測する。

### (5) Zr/Ag 複合線材の機械的特性評価

Zr/Ag 複合線材に対して引張試験を行うことにより機械的特性を評価する。0.2%耐力および引張強さ、弾性率を評価する。弾性率はクリップの把持力に影響を与えることから、現行のチタン合金の弾性率 (約 100 GPa) と比較検討する。

### (6) 脳動脈瘤クリップの試作

アーチファクトを抑制しかつ機械的特性に優れた複合線材を選定し、脳動脈瘤クリップを試作する

## 4. 研究成果

本研究では、磁気共鳴法による画像診断

(MRI)において、アーチファクト(虚像)を発生しない生体用非磁性複合線材の開発を行う。平成23-24年度では、(1)合金元素添加によるZr-Mo合金の磁化率の低減、(2)低磁性Zrと反磁性Agの複合化による磁化率低減、(3)Zr/Ag複合線材のMRIアーチファクト測定、(4)Zr/Ag複合材料の機械的特性の評価と(5)脳動脈瘤クリップの試作を行った。

(1) Zrに対する添加元素にはZrやMoより低い磁化率を持ち、固溶強化が期待できるAlを選択し、Alを添加したZr-Mo合金の磁化率と機械的特性を調べ、これらの特性に及ぼす添加元素Alの影響を検討した。 $\alpha'$ 相から構成され、低磁化率・高延性を有するZr-0.5Mo合金にAlを添加したところ、Al濃度の増加に伴い磁化率は緩やかに減少し、更に強度が上昇した。その結果、Zr-0.5Mo-3Al合金の磁化率は現行の生体用Ti-6Al-4V合金と比較して1/3以下の値を示し、機械的特性は同等の引張強さを示し、MRI対応型生体用合金としての応用が期待できる。

(2) Agを芯材としZrを被覆材することにより複合化を行い、Agの体積率を変化させたZr/Ag複合材料の磁化率に及ぼすAgの影響を検討した。Zr/Ag複合材料はスウェージング加工を行い、減面率64%( $\phi 3$  mm)まで加工し磁化率を評価した結果、Ag体積率の増加に伴い磁化率が直線的に減少した(Fig. 1)。特に、Agの体積率が81%のとき磁化率は $1.88 \times 10^{-5}$ を示し、現在使用されている生体金属材料の中でも低磁性を示すTiの磁化率の約1/10の値を示した。ZrとAg丸棒材の磁化率を用いて、複合則によりZr/Ag複合材料の磁化率を計算したところ、実測値は計算値より高い傾向を示した。XRDより、Zr/Agには集合組織を調べたところ、集合組織が形成されることが確認され、Zr/Ag複合材の磁化率には、結晶配向が影響を与えていることがわかった。

(3) Zr/Ag複合線材のアーチファクトは、Ag割合の増加に伴い減少した(Fig. 2)。Zr/Ag複合材料の磁化率はAg割合の増加に伴い減少することをわかっている。このため、Ag割合の増加に伴うZr/Ag複合材料のアーチファクトの低減はZr/Ag複合線材の磁化率の減少に依存することを意味し、Zr/Ag複合材料でもアーチファクトと磁化率の間で相関が存在することが明らかとなった。

(4) Zr/Ag複合線材の0.2%耐力、引張強度はAg割合の増加に伴いほぼ直線的に減少した(Fig. 3)。Zr線材とZr鋳造材の0.2%耐力を比較すると、線材は鋳造体(207 MPa)より3倍程度高い値を示した。一方、Agでは線材と未加工材では変化は見られなかった。Zr/Ag複合線材の0.2%耐力はAg割合の増加に伴い理論値に近づくことから、Zr/Ag複合線材の

0.2%耐力にはZrの加工硬化の寄与が大きいと考えられる。Zr/Ag複合線材の弾性率は理論値より減少した結果が得られ、Ag割合の増加に伴い減少率が増加している。このことから、弾性率の減少にはAgが関与していると考えられる。

(5) ZrおよびZr/Ag合金の脳動脈クリップの試作ではAg割合が一定以上に増加するとクラックが発生し、Agを被覆するZrが線材加工中にき裂していることを示した。更なる低磁化率の複合材脳動脈クリップ作製には、作製過程に熱処理を施し応力集中を緩和することや低磁化率と機械的性質を兼備したZr-0.5MoおよびZr-0.5Mo-3Al合金から被覆材料が望まれる。

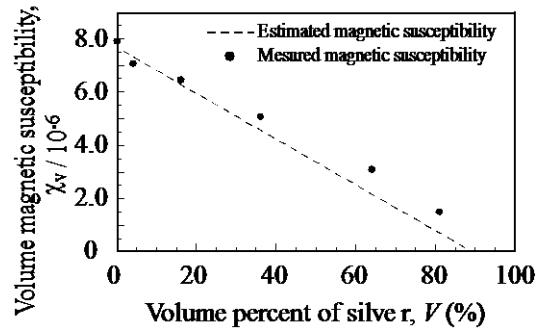


Fig. 1 Magnetic susceptibility of Zr / Ag composite.

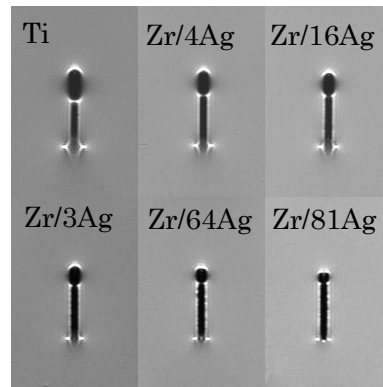


Fig. 2 FSE axial MR images of Ti and Zr/Ag composite

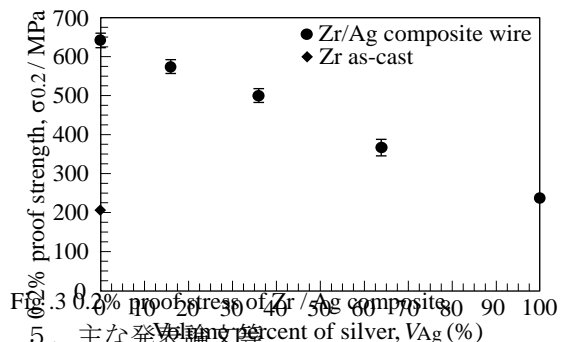


Fig. 3 0.2% proof strength of Zr / Ag composite

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に)

は下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件)

① Ryota Kondo, Ryota Shimizu, Naoyuki Nomura, Hisashi Doi, Suyalatu, Yusuke Tsutsumi, Kazutaka Mitsuishi, Masayuki Shimojo, Kazuhiko Noda, Takao Hanawa, Effect of cold rolling on the magnetic susceptibility of Zr-14Nb alloy, Acta Biomaterialia, 査読あり, 9, 5795-5801, 2013.

doi:10.1016/j.actbio.2012.10.046

② Ryota Kondo, Naoyuki Nomura, Suyalatu, Yusuke Tsutsumi, Hisashi Doi, Takao Hanawa, Microstructure and mechanical properties of as-cast Zr-Nb alloys, Acta Biomaterialia, 査読あり, 7, 4278-4284, 2011.

doi:10.1016/j.actbio.2011.07.020

③ Suyalatu, Ryota Kondo, Yusuke Tsutsumi, Hisashi Doi, Naoyuki Nomura, Takao Hanawa Effects of phase constitution on magnetic susceptibility and mechanical properties of Zr-rich Zr-Mo alloy, Acta Biomaterialia, 査読あり, 7, 4259-4266, 2011.

doi:10.1016/j.actbio.2011.07.005

〔学会発表〕(計 23 件)

① 蘇亜拉図、野村直之、土居壽、堤 祐介、塙 隆夫、Zr-Mo 合金の磁化率と機械的特性に及ぼす熱処理および Al 添加の影響、日本金属学会 2013 年春期講演大会、2013 年 3 月 28 日 東京理科大学神楽坂キャンパス

② 野村直之、清水良太、近藤亮太、蘇亜拉図、堤祐介、土居壽、野田和彦、塙 隆夫、Sn 添加した Zr-Nb 合金の磁化率に及ぼすスウェージ加工と熱処理の影響、日本金属学会 2013 年春期講演大会、2013 年 3 月 28 日 東京理科大学神楽坂キャンパス

③ 堺貴啓、近藤亮太、蘇亜拉図、右田聖、堤祐介、土居壽、野村直之、塙 隆夫、MRI アーチファクト防止型低磁性 Zr/Ag 複合材料の作製と機械的性質、日本バイオマテリアル学会シンポジウム 2012、2012 年 11 月 27 日 仙台国際センター

④ 清水良太、近藤亮太、堺貴啓、土居壽、堤祐介、蘇亜拉図、右田 聖、野村直之、野田和彦、塙隆夫、Sn 添加 Zr-Nb 合金の磁化率に及ぼす加工の影響日本バイオマテリアル学会シンポジウム 2012、2012 年 11 月 27 日 仙台国際センター

⑤ Shimizu R, Kondo R, Sakai S, Migita S, Suyalatu, Nomura N, Noda K, Hanawa T. Effect of cold-rolling on the magnetic susceptibility of Zr-9Nb-3Sn alloy, The 5th International Symposium on Designing and Properties of Advanced Engineering Materials (ISAEM-2012), 2012 年 11 月 06 日, Toyohashi, Japan

⑥ Sakai T, Kondo R, Suyalatu, Migita S, Tsutsumi Y, Doi H, Nomura N, Hanawa T. Magnetic susceptibility of Zr/Ag composites preventing artifacts in MRI, The 3rd International Symposium on Advanced Materials Development and Integration of Novel Structural Metallic and Inorganic Materials (AMDI-3), 2012 年 11 月 06 日, Toyohashi, Japan

⑦ 堺貴啓、近藤亮太、蘇亜拉図、右田聖、堤祐介、土居壽、野村直之、塙隆夫、MRI アーチファクト防止型医療用 Zr/Ag 複合線材の機械的性質、第 60 回日本歯科理工学会学術講演会、2012 年 10 月 13 日 九州大学医学部百年講堂

⑧ 堺貴啓、近藤亮太、蘇亜拉図、右田聖、堤祐介、土居壽、野村直之、塙隆夫、低磁性 Zr/Ag 複合線材の機械的性質、日本金属学会 2012 年秋期講演大会、2012 年 09 月 18 日 愛媛大学城北キャンパス

⑨ 清水良太、野田和彦、近藤亮太、堺貴啓、右田聖、蘇亜拉図、堤祐介、土居壽、野村直之、塙隆夫、Sn 添加 Zr-Nb 合金の磁化率に及ぼす加工の影響、日本金属学会 2012 年秋期講演大会、2012 年 09 月 18 日 愛媛大学城北キャンパス

⑩ Lee J, Nomura N, Kondo R, Suyalatu, Ueno T, Wakabayashi N, Igarashi Y, Hanawa T. The influence of compositional change on mechanical properties and magnetic susceptibility of Ti-Zr binary alloys as implant materials, 9th World Biomaterials Congress (9th WBC), 2012 年 06 月 02~03 日, Chengdu, China

⑪ Nomura N, Nakagawa S, Suyatatu, Kondo R, Doi H, Tsutsumi Y, Noda K, Hanawa T. Effect of Sn addition on the magnetic susceptibility of Zr-Nb alloy preventing artifacts in MRI, 9th World Biomaterials Congress (9th WBC), 2012 年 06 月 02~03 日, Chengdu, China

⑫ Kondo R, Shimizu R, Sakai T, Suyalatu, Doi H, Tsutsumi Y, Noda K, Nomura N, Hanawa

T. Effect of cold-rolling on magnetic susceptibility of Zr-14Nb alloy preventing artifact in MRI, 9th World Biomaterials Congress (9th WBC), 2012 年 06 月 02~03 日, Chengdu, China

⑬堀貴啓、近藤亮太、蘇亜拉図、堤祐介、土居 壽、野村直之、塙隆夫、MRI アーチファクト防止型歯科用 Zr/Ag 複合材料の作製、第 59 回日本歯科理工学会学術講演会、2012 年 04 月 14 日 徳島県郷土文化会館 あわぎんホール

⑭近藤亮太、野村直之、蘇亜拉図、堤祐介、土居壽、塙隆夫、MRI アーチファクト防止型歯科用 Zr-Sn 合金の組織と磁化率、第 59 回日本歯科理工学会学術講演会、2012 年 04 月 14 日 徳島県郷土文化会館 あわぎんホール

⑮堀貴啓、近藤亮太、蘇亜拉図、堤祐介、土居 壽、野村直之、塙隆夫、MRI 対応低磁性 Zr/Ag 複合線材の作製、日本金属学会 2012 年春期講演大会、横浜大学常磐台キャンパス 2012 年 3 月 30 日

⑯近藤亮太、瀧田美奈、蘇亜拉図、堤祐介、土居壽、野村直之、塙隆夫、低磁性を示す Zr-Sn 合金の組織と磁化率、日本金属学会 2012 年春期講演大会、横浜大学常磐台キャンパス 2012 年 3 月 30 日

⑰ N. Nomura, R. Kondo, Suyalatu, Y. Tsutsumi, H. Doi, T. Hanawa Effects of phase constitution on the magnetic susceptibility and mechanical properties of Zr-Nb alloys preventing artifacts in MRI, International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues, 2011 年 12 月 02~03 日, Waikoloa Beach Marriott Resort & spa (Hawaii)

⑱近藤亮太、清水良太、中川 俊、蘇亜拉図、堤祐介、土居 壽、野田和彦、野村直之、塙隆夫、MRI 対応 Zr-14Nb 合金の機械的特性に及ぼす熱処理の影響、日本バイオマテリアル学会、2011 年 11 月 22 日 京都テルサ

⑲清水良太、近藤亮太、中川 俊、野田和彦、土居 壽、堤祐介、蘇亜拉図、右田 聖、野村直之、塙隆夫、MRI 対応 Zr-Nb 合金の磁化率に及ぼす冷間圧延の影響、日本バイオマテリアル学会、2011 年 11 月 22 日 京都テルサ

⑳近藤亮太、清水良太、中川 俊、野田和彦、蘇亜拉図、堤祐介、土居壽、野村直之、塙隆

夫、Zr-14Nb 合金の磁化率と機械的特性に及ぼす熱処理の影響、日本金属学会、2011 年 11 月 7 日 沖縄コンベンションセンター

㉑中川俊、清水良太、近藤亮太、野田和彦、蘇亜拉図、堤祐介、土居 壽、野村直之、塙隆夫、Zr-Nb 合金の機械的性質に及ぼす Sn 添加の影響、日本金属学会、2011 年 11 月 7 日 沖縄コンベンションセンター

㉒清水良太、近藤亮太、中川俊、野田和彦、蘇亜拉図、堤祐介、土居壽、野村直之、塙隆夫、MRI 対応 Zr-14Nb 合金の磁化率に及ぼす冷間圧延の影響、日本金属学会、2011 年 11 月 7 日 沖縄コンベンションセンター

㉓ Naoyuki Nomura, Suyalatu, Ryota Kondo, Yusuke Tsutsumi, Hisashi Doi, Takao Hanawa, Effects of Phase Constitution on the Magnetic Susceptibilities and Mechanical Properties of Zr-Mo Alloys Preventing Artifacts in MRI, Asian Biomaterials Congress, 2011 年 9 月 16 日 BEXCO Busan

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蘇 亜拉图 (SU YALATU)

東北大学・金属材料研究所・助教

研究者番号：80611532

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：