

高機能 TiNi 形状記憶合金の開発

[研究代表者] 松井良介 (工学部機械学科)

研究成果の概要

TiNi 形状記憶合金 (shape memory alloy、以下 SMA) は、他の合金系の SMA と比べ機械的特性の信頼性が高いことや生体適合性に優れるなどの利点から、ステントをはじめとする様々な医療用デバイスへの応用が期待されている。しかしながら例えば下肢静脈に血栓が生じる深部静脈血栓症の治療では、現在は動脈用ステントの適用外使用が検討されているが、拡張力不足が指摘され、高拡張力を有するステントが待たれている。このような背景に鑑み、本研究では、高加工率の TiNi 形状記憶合金チューブから高拡張力ステントを作製する独自のプロセスを提案してきている。本高拡張力ステントの実用において、疲労寿命は従来品同等以上を確保する必要がある。そこで本稿では、高拡張力ステントに対して半径方向単軸圧縮モードの疲労試験を行い、得られた疲労破面形態から疲労特性を考察した。さらに、ステントに作用する局所変形について検討を加えた。本研究で得られた主な成果は以下に示す通りである。(1) 5 min の最終熱処理を施した加工率 60% の試験片は良好な疲労寿命を示し、血管拡張力と疲労寿命の両立が期待される。(2) 単軸圧縮変形モードにおいて繰返し負荷を与えると、ストラットの外側から内側に向かって疲労き裂が進展し、やがて破断する。(3) ストラットの破断部近傍には曲げとねじりの変形が複合的に加わり、複雑な応力・ひずみ分布が現れる。

研究分野：材料力学、材料工学

キーワード：TiNi 形状記憶合金、耐食性、ステント、疲労、フラクトグラフィ

1. 研究開始当初の背景

TiNi 形状記憶合金 (shape memory alloy、以下 SMA) は、他の合金系の SMA と比べ機械的特性の信頼性が高いことや生体適合性に優れるなどの利点から、ステントをはじめとする様々な医療用デバイスへの応用が期待されている。ステントは血管や消化管の狭窄部を内側から押し広げるデバイスであり、一般的な治療方法の一つとして知られているが、病態や部位によってはさらなるニーズがある。例えば下肢静脈に血栓が生じる深部静脈血栓症の治療では、現在は動脈用ステントの適用外使用が検討されているが、拡張力不足が指摘され、高拡張力を有するステントが待たれている。

2. 研究の目的

このような背景に鑑み、本研究では、高加工率の TiNi 形状記憶合金チューブから高拡張力ステントを作製する独自のプロセスを提案してきている。本高拡張力ステントの実用において、疲労寿命は従来品同等以上を確保する必要がある。そこで本稿では、高拡張力ステントに対して半径方向単軸圧縮モードの疲労試験を行い、得られた疲労破面形態から疲労特性を考察する。これに加えて、ステントに作用する局所変形について検討を加えた結果も示す。

3. 研究の方法

(1) 試験片

試験片には、株式会社古河テクノマテリアル製の公称組

成 Ti-51.0 at% Ni 溶製材に各種加工熱処理を施し、ステント形状に加工したものを使用した。まず、冷間加工率 40% および 60% で伸線加工されたチューブ材に対し、材料の直進性を得るためにスウェーjing加工と低温短時間の熱処理を施した。その後、レーザー加工機でカットし、加熱しながらステント形状に拡張した。常温におけるステントの形状は外径 10 mm、長さ 19 mm であり、これを最終拡張熱処理で得た。このようにして作製したステントを試験片として使用した。最終拡張熱処理において、保持温度は 773 K とし、保持時間は 5 min と 30 min とした。

(2) 実験方法

半径方向単軸圧縮モードにおける疲労試験には、株式会社島津製作所製の Auto-graph AGS-X を用いた。試験はストローク制御で行い、押し込み速度は 2 mm/s とした。最大押し込み量は 6 mm から 8 mm の間で種々に変化させ、除荷後の最小押し込み量は 1 mm に規定した。実験中の雰囲気温度は、人間の体温を想定した 310 K (37 °C) とし、恒温槽で制御した。疲労破断面観察は、総研に設置の日本電子株式会社製 FE-SEM JSM-6700F を用いて行った。

4. 研究成果

疲労試験で得られた、各加工率および最終拡張熱処理時間におけるステント試験片の疲労寿命曲線を Fig. 1 に示す。この図からわかるように、5 min の最終熱処理を施した加工率 60% の試験片において良好な疲労寿命を示すことがわかる。この条件において血管拡張力に対応するラジアルフォースが最も大きくなるのが先行研究で明らかになっており、これを鑑みると血管拡張力と疲労寿命の両立が期待される。この最も期待される条件で作製したステント試験片について疲労破断面の SEM 観察を行い、破壊の特徴を調べた。

加工率 60%、最終熱処理時間 5 min のステント試験片における疲労破断面 SEM 画像の一例を Fig. 2 に示す。左の SEM 画像は破断面周辺を、右は破断部を拡大して撮影したものである。

まず左の SEM 画像に注目すると、ストラット軸方向に対して斜めに破面が広がっていることがわかる。次に右の拡大 SEM 画像に注目すると、ストラットの外側に疲労き裂進展領域が確認され、内側には最終破断領域に現れるディンプルの存在を確認できる。このことよりストラットの

外側から内側に向かって疲労き裂が進展したと言える。ストラット軸方向に対して傾斜した疲労破面は、少なくともストラットの破断部周辺にねじり変形が加わっていることを示唆する。このことを明らかにするために、レーザー顕微鏡を使用して半径方向単軸圧縮変形中のストラット破断部近傍を簡易形状測定した。その結果、押し込み量 8 mm の条件では少なくとも 150 rad/m の非常に大きなねじり変形が作用することがわかった。これに加えて同じ箇所にも最大 2.6% の曲げひずみも作用することが確認され、引張りの最大曲げひずみは疲労き裂の起点側に現れることを確かめた。以上のことから、破断部近傍には複雑かつ大きな負荷が加わり、引張りの最大曲げひずみが発生するストラット外側から疲労き裂が発生・進展し、破断に至ったことが明らかとなった。今後は表面性状の改善にも取り組み、疲労寿命の更なる改善を図る必要があると考えている。

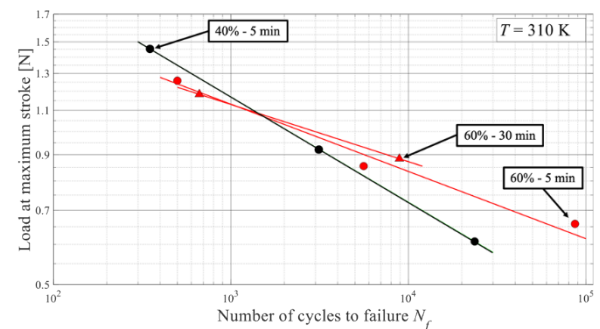


Fig. 1 Fatigue life curves of TiNi SMA stents

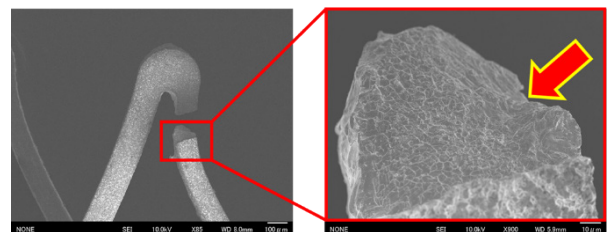


Fig. 2 Fatigue fracture surface of TiNi SMA stent

5. 本研究に関する発表

- (1) 松井良介、宮本崇志、濱川悠太、服部兼久、“超音波ショットピーニングによる傾斜機能 TiNi 形状記憶合金の機能特性の改善”、ばね論文集、2023 年 (掲載決定)
- (2) 松井良介、“形状記憶合金の基本挙動と高機能化への取り組み”、形状記憶合金協会 Web セミナー、2022 年他 11 件

謝辞

本研究は JSPS 科研費 22K04765 を受けて実施しました。