

氏 名	まるい りょう 圓 井 良
学位(専攻分野)	博 士 ( 学 術 )
学 位 記 番 号	博 甲 第 5 1 6 号
学位授与の日付	平成 20 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 3 条第 3 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 先端ファイプロ科学専攻
学 位 論 文 題 目	金属繊維を用いた筒編物の変形挙動解析とその応用
審 査 委 員	(主査)教授 濱田泰以 教授 藤井善通 教授 鋤柄佐千子 准教授 仲井朝美

### 論文内容の要旨

筒編物は、これまで綿やポリエステルなどを材料として、一般に靴下や肌着、刺繍の飾り紐などの衣料品に多く使用されており、その構造や力学的特性については国内外で多くの報告がなされている。一方、ステンレス、銅、銀、マグネシウムや形状記憶合金といった金属繊維は、金属の特性である高強度、高導電性、高耐熱性などの材料特性を活かし、さらに編物構造を形成することにより、柔軟性、弾力性を備えた産業資材としてフィルター、電磁波シールド材、耐熱性インシュレーターなどの産業資材や生体管腔臓器の狭窄治療用の内径拡張用支持具(ステント)として医療分野で使用されている。しかし、その構造や力学的特性に関する報告はほとんどされていないのが現状である。そこで、本研究では金属繊維筒編物を製編し、その製編条件と力学的特性の関係、引張変形挙動を明らかにすることを目的とした。さらに、金属繊維製編技術の蓄積を背景に、極端に物性の異なる素材を螺旋状に複合製編することで、製編された筒編物に複数の構造特性を付加することが可能であると考えた。例えば医療用のチューブ、ステントには円周方向の拡張力、屈曲部の円筒形状保持能力、形状追従性が求められる。本論文ではステンレス繊維とポリエステル繊維からなるハイブリッド筒編物を考案し、その力学的特性について検討した。

第 1 章では、よこ編物とたて編物についてそれぞれの代表的な組織を紹介し、その製編原理と構造について解説した。

第 2 章では、ステンレス繊維筒編物の引張荷重下における編目の変形挙動と物性の変化について検討した。さらに、有限要素法を用いて初期弾性率の予測を試みた。3 次元はり要素を用いて、編目構造を表現したモデルを作成し、初期弾性率を算出、実験結果との比較を行った。解析に際し、金属繊維同士の接触が予想される部分を仮想的なはり要素で連結し、その弾性率を金属繊維の弾性率に対し非常に低い値(具体的には 10MPa ~ 30MPa)とした場合、実験で得られた初期弾性率とよい対応が可能となることが明らかになった。また、コース方向とウェール方向とでは、引張特性に異方性が示された。

第 3 章では、ステントに必要な拡張力を評価するため、編目構造を変化させた金属繊維筒編物の横圧縮特性について検討した。金属繊維筒編物はコース方向とウェール方向の密度を調整することにより異方性を設計し、拡張力の最適設計が可能となることが明らかになった。さらに横圧縮特性を予測する手法を構築することを目的とし、有限要素解析を実施した。金属繊維筒編物の横

圧縮特性は、金属繊維筒編物の異方性引張特性を材料定数とするシェル要素を用いた有限要素解析によって予測可能であることが示唆された。

第 4 章では、医療現場における医療用チューブの必要性と理想的な要求特性について解説した。ここで、理想的な要求特性とは、癌などによって管腔臓器が受ける外圧力に対するチューブの拡張力として内腔開大性(拡張力)、円筒形状を維持しつつ、腸のように複雑に入くだ形状に変形できる能力として形状追従性(反発力)、屈曲部位でも内腔が閉塞せず円筒形状を維持する能力として形状保持能力(耐キンク性)をさす。現行の金属製医療用チューブは、単一素材で構成されているため、十分な拡張力を有するが、屈曲時には内径が閉塞するキンク現象が発生するため、屈曲部位には使用できない。そこで、拡張力と形状追従性および耐キンク性を有するハイブリッド筒編物を提案し、その製造方法と構造について解説した。

ハイブリッド筒編物を製編後、マンドレルを抜去すると編地がウェール方向に大きく収縮する試験片と、収縮率の低い試験片が存在する。これはマンドレル抜去後、ステンレス繊維のシンカーリングが内径側に傾倒することによって収縮するため、ポリエステル繊維のウェール方向の編目密度が高い場合、その収縮率は低くなっていることが明らかになった。

第 5 章では、ハイブリッド筒編物の円周方向の拡張力に、ステンレス繊維の線径およびウェール方向の編目密度が与える影響について検討するため、横圧縮試験を実施した。その結果、拡張力は線径の増大に伴い高い値を示すことが明らかになった。また、ステンレス繊維の内径側への傾倒が生じた場合、拡張力と編目密度には高い相関関係が認められ、ステンレス繊維の内径側への傾倒の有無が、拡張力に与える影響が大きいことが明らかとなった。

第 6 章では、ハイブリッド筒編物の形状追従性を評価をするため、編目構造を変化させた場合の反発力試験を実施した。その結果、ステンレス繊維の内径側への傾倒が生じた場合、反発力と編目密度および、算出した曲げ弾性率と編目密度には高い相関関係が認められる。また、曲げ弾性率は反発力を材料定数化したものであることより、曲げ弾性率は形状追従性の指標として使用出来ることが明らかとなった。

第 7 章では、ハイブリッド筒編物の屈曲部の円筒形状保持能力を評価するため、編目構造を変化させた場合の屈曲試験を実施した。その結果、耐キンク性の向上にはステンレス繊維の内径側への傾倒が必須であることが明らかとなった。また、屈曲部の座屈強度の算出を試みたが、座屈強度と耐キンク性は相関が認められないことが判明した。しかし、座屈強度と拡張力の間には高い相関性が認められた。座屈強度は反発力試験の結果より算出した曲げ弾性率と、耐キンク性試験より得られた最小曲率半径をもとに算出された値であるため、反発力試験および耐キンク性試験より拡張力試験の結果予測が可能であることが示唆された。

第 8 章では、本研究で作製したハイブリッド筒編物の医療器具としての実用化を目的に、医療用チューブとして要求される 3 つの要素、すなわち内腔開大性、形状追従性、円筒形状保持能力について相対比較評価した。これらの結果より、ステントの実用化に耐えうる素材(個々の材料物性、線径、材料比率の組合せ)と編目構造(編目形状と編密度)の組合せを最適化することによって、ステントの実用化に最適な編物構造設計の一指針を提示することができた。

## 論文審査の結果の要旨

本論文では、金属繊維筒編物の産業資材分野への応用に着目し、その物性と編目の引張変形挙動について明らかにしている。また、その応用としてハイブリッド筒編物の開発に成功したことが大きな成果である。ハイブリッド筒編物はステンレス繊維とポリエステルマルチフィラメントのように極端に剛性の異なる繊維同士を交互に螺旋状に製編し、筒編地の剛性をステンレス繊維に、柔軟性をポリエステルマルチフィラメントに機能分担させるといった、他に類を見ない独創的かつ画期的な概念から設計され、本論文で初めて実現された。

さらに、本研究によって開発されたハイブリッド筒編物をステント（管腔臓器狭窄疾患治療に用いられる筒状の構造物）としての使用の可能性を評価するため、ステントの要求特性として挙げられている内腔開大性、形状追従性、形状保持能力について定量的に評価し、ステントとしての実用化に最適な編物構造設計の一指針を提示したところは工業的に意義深い。

本論文の内容は次の5報および8報の参考論文等に報告されており、そのうち8報の報文および3通の特許において申請者が筆頭著者となっている。

1. 圓井 良、仲井 朝美、濱田 泰以、「金属繊維編物の引張変形挙動に関する研究」繊維学会誌(印刷中)
2. Ryo Marui, Asami Nakai, Hiroyuki Hamada, "Expansive force in circumference direction of hybrid knitted Stent" Proceedings of the Seventh joint Canada-Japan workshop on composites(印刷中)
3. 圓井 良、仲井 朝美、濱田 泰以、「金属繊維筒編物の横圧縮特性」繊維学会誌(審査中)
4. 圓井 良、坂井 貴行、仲井 朝美、濱田 泰以、「ハイブリッド円筒編物の製編と構造」繊維学会誌(審査中)
5. 圓井 良、坂井 貴行、仲井 朝美、濱田 泰以、「ハイブリッド円筒編物の拡張力試験」繊維学会誌(審査中)

## 参考論文等

1. Y.Shomura, N.Tanigawa, T.Tokuda, S.Kariya, A.Komemushi, H.Kojima, S.Sawada, R.Marui, A.Nakai, H.Hamada, Structural characteristics of a composite material stent knitted with a metallic wire and a non-metallic fiber: comparison with a metallic stent, Proceeding of 93rd. Scientific Assembly and Annual Meeting, Radiology Society of North America(RSNA)183(2006)
2. Y.Shomura, T.Tokuda, N.Tanigawa, H.Kojima, S.Kariya, A.Komemushi, R.Marui, M.Kotaki, A.Nakai, H.Hamada, An Arterial Stent Graft Covered with an Electro-spun Nanofiber Sleeve; Structural Characteristics and in Vivo Behavior in Pig Model, Proceeding of 2006 annual meeting, Cardiovascular and Interventional Radiology Society of Europe(CIRSE)618(2007)
3. Ryo MARUI, Asami NAKAI, Hiroyuki HAMADA, "Anisotropic Nature in Tensile Deformation Behavior of Metal Cylindrical Knitted Fabric" Textile Research

Journal(投稿予定)

- 4.圓井 良、仲井 朝美、濱田 泰以、「ハイブリッド円筒編物の反発力試験(第二報)」繊維学会誌(投稿予定)
- 5.圓井 良、仲井 朝美、濱田 泰以、「ハイブリッド円筒編物の屈曲特性」日本機械学会誌(投稿予定)
- 6.特開 2006-296559 ( H18.11.02 公開)  
『金属および生体吸収性材料の複合材料による医療用ステント、その製法およびこれに用いる編機』
- 7.特開 2008-11942(H20.01.24 公開)  
『医療用チューブ』
- 8.特開 2004-55503(H16.02.19)  
『コネクタ付き電磁波シールドケーブルの製造方法および  
コネクタ付き電磁波シールドケーブル用金属繊維類筒編品』

以上のとおり、本論文の内容は十分な新規性と独創性、さらに工業的な意義があり、博士論文として優秀であると審査員全員が認めた。