

〔論文〕

折り畳み式筒状管路の設計と流体解析評価に関する研究 — 折り紙工学を用いた人工呼吸器用ディスポーサブル管路の開発 —

土肥 裕司*, 原田 敦史*²

*日本文理大学保健医療学部保健医療学科

*²日本文理大学工学部機械電気工学科

Research on Design and Fluid Analysis Evaluation of Foldable Tubular Pipes — Development of Disposable Tube for Ventilator Using Origami Engineering —

Hiroshi DOHI*, Atsushi HARADA*²

*Department of Health Sciences, School of Health Sciences, Nippon Bunri University

*²Department of Mechanical and Electrical Engineering,
School of Engineering, Nippon Bunri University

Abstract

During the onset of the novel coronavirus pandemic in 2020, there was a surge in the use of disposable medical devices. This led to an increased demand for disposable tubing, particularly in the context of ventilator utilization. Given that there was no readily storable disposable tubing available, we turned to origami engineering to create a foldable design, anticipating future needs. To ensure the tubing would not become blocked due to twisting when folded, we designed it with a flat layout that incorporated two isosceles triangles for the folds. We experimented with three different folding angles based on the bottom angle of the triangles: $45^\circ/20^\circ$, $35^\circ/15^\circ$, and $30^\circ/12^\circ$. Subsequent testing focused on the foldability of these designs and the efficiency of the flow channel, which we evaluated using computational fluid dynamics (CFD). Our findings revealed that the tubing designed with the $35^\circ/15^\circ$ folding angles provided an optimal balance between foldability and flow channel performance.

キーワード：人工呼吸器, 折り紙工学, 流体工学, CFD (Computational Fluid Dynamics)

Keywords : ventilator, origami engineering, Fluid engineering,
CFD (Computational Fluid Dynamics)

1. はじめに

2019年12月、中国湖北省武漢市で原因不明の肺炎が多発し、同31日、44人の感染がWHO（World Health Organization, 世界保健機関）から報告された。これらの患者の多くが生きた動物や魚介類を扱う市場（華南海鮮市場）と接点があったことから、何らかの動物からの感染が疑われ、2020年1月1日、この市場は閉鎖された。同7日には中国の研究者により、本感染症の病原体が新型コロナウイルスであることが報告され、12日にはウイルスの全遺伝子配列も公開、“2019-nCoV”と呼称された。武漢市政府は23日、市外に出る航空便や鉄道等公共交通機関の運行を停止する措置を開始したが、患者数の増加は止まらず、同30日、WHOは本件が「国際的に懸念される公衆衛生上の緊急事態」（Public Health Emergency of International Concern : PHEIC）に該当すると宣言した。2月11日、WHOは本疾病を“COVID-19”と命名した⁽¹⁾。日本では2020年3月上旬に、主に都市部において集団発生が報告され、感染者数は急増し、4月初旬をピークとした大きな流行となった。

このようにわずか数カ月ほどの間に、新型コロナウイルスによる感染症が世界的に流行し、国内においても感染に伴う重症肺炎の患者が増加していった。重篤肺炎患者の治療に対して、人工呼吸器やネーザルハイフロー（鼻腔内に高流量30-60L/minの酸素空気混合ガスを投与する）などの医療機器が人体の酸素化を改善するため、積極的に使用されることになった。この人工呼吸器を使用する場合、患者一人に1台が割り当てられ、呼吸回路と呼ばれる管路を介して生体にガスが送り込まれている。通常、呼吸回路は熱可塑性プラスチックで作られており、約1-2週間程度の装着後は消毒して再利用するものが多い。本研究のきっかけとなった、感染力の強いウイルスである新型コロナウイルスに感染した患者に対して使用される配管は、医療機器を介した感染を防止する観点から、単回使用（ディスポーザブル）が原則である。また使用される配管の長さは、病床において決まった配置等が無いため、さまざまな場面で使用できるよう可変的な設計が求められていた。単回使用の観点から、使用前のコンパクトに折り畳んで収納が可能なものが今後、求められる一方で、このようなものは現在、活用されていない。可変的な設計で折り畳めるものということに注目した場合、医療分野では、ステントやステントグラフトなどに限られている。伸縮可能な配管は、収納性の向上が期待されることから、人工呼吸器と患者を

繋ぐ配管に留まらず、小さな隙間から挿入し、内部で立体展開する管路への応用が期待される。

2. 研究目的

本研究では、「伸縮可能」と「折り畳む」という観点から、日本の古来より伝わる伝統的折り紙に注目し、この技術を構造設計のアイデアとして利用することを提案する。本研究の目的は、伸縮可能な配管（以下、折り紙管路）を設計し、流路として実用性の高い管路を製作することである。今回は人工呼吸器で使用することを想定し、折り畳める上に、流路として圧力損失の少ない、折り紙管路を製作する（図1）。流路としての管路内流れの評価は数値流体力学（CFD）を用いて行い、管路の形状は、折り畳まれた状態ではなく展開した状態を評価している。

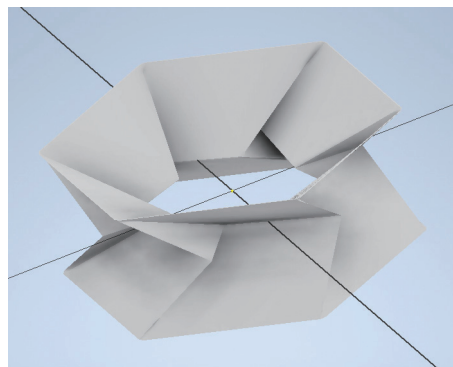


図1. 折り畳み式筒状管路の設計

3. 実験装置

3-1 立体折り紙の幾何

日本で誕生した折り紙は、1枚の紙を折って目的の対象物を創造するものである。芸術的観点の高い折り紙ではあるが、今やその折り紙は数学と結びつき、折り紙工学へと発展し、構造設計のアイデアとして1995年にJAXAが打ち上げたミウラ折り型太陽電池パネルの展開や飲料缶のダイヤパターンなどで実用化されている。

立体的な形を1枚の紙を折り曲げて作る場合、展開図が考察のスタートであり、対象とする立体の面上のある点に注目した場合、その点の周りの角度の和が 360° より小さい場合や大きい場合、展開図上に隙間や重なりが生じてしまう。そのため、1枚の紙で作られる形状は、その表面のあらゆる点で、周りの角度の和が 360° である必要がある。このような条件を満たし、伸縮なく平面に展開可能な曲面は可展面と呼ばれる。可展面は直線要素の

集合で定義される繊維面の1つで、どの点においてもガウス曲率がゼロであるという特徴がある⁽²⁾。

3-2 折り畳み式筒状管路の2次元展開図

配管と言えば、ジャバラであり、一見妥当な折り畳み変形をしているように見えるが、剛体折りは不可能である。よく観察すると折り畳みの途中に折り線の位置が移動して、材料がしごかれるように変形している。それゆえジャバラはカドの部分の部分が柔らかい材料で作られ、機構に追従するカバーとしては用いられても、それ自身を駆動させるようなメカニズムとしては、使用することができない⁽³⁾。また、折り紙技術を用いた配管には、「螺旋型円筒折り紙構造」とよばれる上から圧力をかけると回転しながら折り畳まれる展開構造物が存在している。しかし、この展開構造物は折り畳まれると、内腔が狭くなり閉塞気味になることが問題であり、人工呼吸器などの医療用配管としては使用できない。

そこで本研究で用いる平面展開図は、三谷⁽⁴⁾が開発した伸縮カプセルを参考に折り畳みやすさを考慮した図2と図3に示す構築線から2つの底角を持つ二等辺三角形を組み合わせた展開図を作成した。

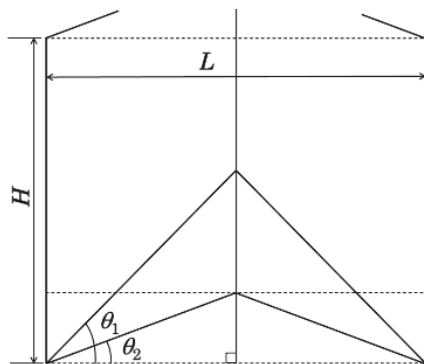


図2. 二次元展開図（折り目単体）

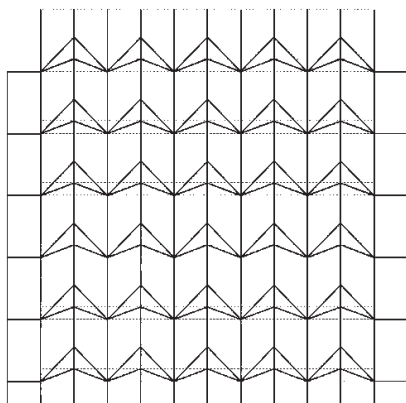
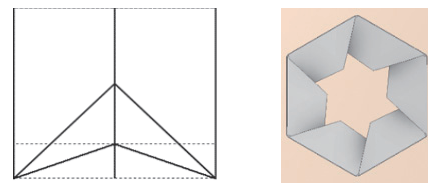
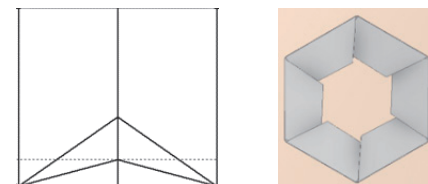


図3. 二次元展開図（タイプ1）

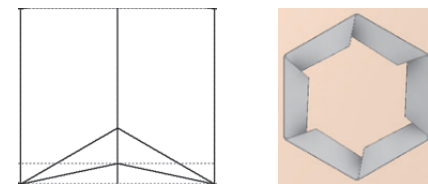
これらは、寸法調整や断面形状変更を容易に行えるよう、CADソフトを用いて作成した。断面形状においては、試作を繰り返す中で、「折り畳みやすさ」と「管路の曲がりやすさ」を考慮して、六角形とした。図4(a)に示す寸法、幅 $L=30\text{mm}$ 、高さ $H=27\text{mm}$ 、角度 $\theta_1=45\text{deg}$ 、 $\theta_2=20\text{deg}$ から成るタイプ1折り紙管路とし、その他の長さは同一とした上で角度を変化させた、角度 $\theta_1=35\text{deg}$ 、 $\theta_2=15\text{deg}$ （図(b)）、角度 $\theta_1=30\text{deg}$ 、 $\theta_2=12\text{deg}$ （図(c)）の三種類の管路を製作して性能を比較した。



(a) タイプ1 管路 (45deg・20deg)



(b) タイプ2 管路 (35deg・15deg)



(c) タイプ3 管路 (30deg・12deg)

図4. 管路形状

3-3 折り紙管路の製作

3-2節で作成した展開図を、しわが入りにくい上質紙を用いて折り紙管路を製作した。剛体折り紙を実際の材料で工学的に応用するためには、厚みを処理する必要がある。筒状管路の材料として使用する上質紙の紙厚を、一般コピー紙の0.08mmから、0.18mmへ変更したことにより、紙にしわが入りにくくなった。その一方で、紙の厚みが増したことにより、鉄筆を用いたクセ付けでは精度の高い折り目が作成できないことが判明した。厚みが増した紙を折るために、カッティングマシンをスジ付け機として用い、機械に折り目を作らせることで、折り目精度の高い管路の製作を行っている。クセ付けの方法は、紙に切り込みを入れることで折り目を作り、紙の折り目線上に0.1mmの深さで溝入れ加工した。

これにより正確に折り畳むことが可能となり、折り紙を傷めることなく、図5のように折り畳むことに成功した。

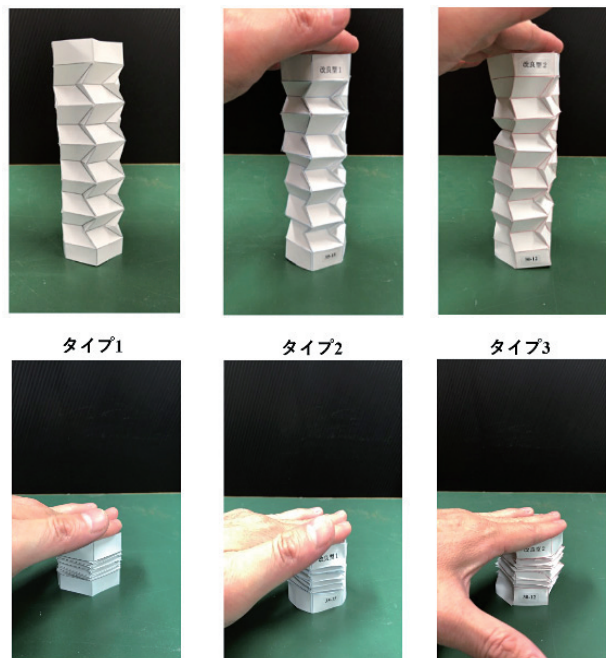


図5. 折り畳みの検証

表1. 折り畳みの検証結果

折り紙管路	折り畳み	収納性	管路断面積
タイプ1	良好	1/10	433 mm ²
タイプ2	良好	1/9	452 mm ²
タイプ3	劣る	1/7	915 mm ²

折り畳みの検証について表1のようにまとめた。タイプ1とタイプ2は折り畳みやすさと収納性に優れており、タイプ3は折り目に沿って折り畳めていないため収納性が低下した。この折り畳み性能低下の原因は、折り目の二等辺三角形の底角が三種類の折り紙管路の中で最も小さくなったことで管路断面積を大きくできたが、折り目同士が接近しすぎたことにより、折り目の重なる箇所で厚みが増し、収納性が悪化したと考えられる。

4. 数値流体力学を用いた管内流れの観察結果

本研究において注目した折り紙管路における基本的な特性の確認および、管路内流れの諸性質を知るために、シミュレーションによる解析を実施した。解析ソフト

は、MSC Software社のCradle CFDを用いた。解析は、非定常3次元解析を用いており、乱流モデルはRANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations: レイノルズ平均モデル) 型のSST $k-\omega$ モデルを用いた。このモデルは、自由流れと乱流モデル化に強い $k-\epsilon$ モデルと圧力の逆勾配や剥離を伴う境界層流れのモデル化に強い $k-\omega$ モデルの長所を合わせもつモデルであり、本解析は低レイノルズ数領域を扱うことから、この乱流モデルを用いた。また解析条件となる作動流体は非圧縮性乾燥空気とし、非定常流れとした。解析する形状や計算に必要なメッシュは、30万のポリヘドラルメッシュ (図6) を作成し、サンプリング間隔0.01秒で1000サイクル計算した。解析の様子を図7に示す。

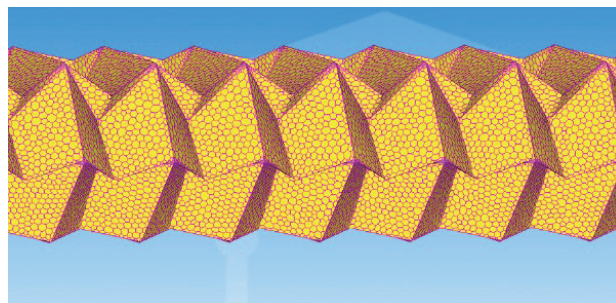


図6. ポリヘドラルメッシュ

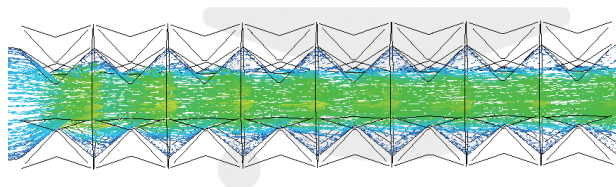


図7. Cradle CFD を用いた解析の様子

三種類の折り紙管路と段差の付いていない直管路を比較した解析を行った。管路の長さは450mm、直径は製作のしやすさから47mmとした。またCFDを実測 (風洞実験) に近い精度で行うために、折り紙管路前後の流入部と流出部を、境界条件が結果に対して直接作用することを防ぐよう延長した後に解析を実行した⁽⁵⁾。

本研究では、流速0.2m/s、0.5m/s、0.8m/sの空気を流入させ、管路両端の圧力差を解析した。その結果を表2と図8に示す。

表2. 数値流体力学 (CFD) による管路両端の圧力差

	比較用 円筒管	タイプ1 45deg・20deg	タイプ2 35deg・15deg	タイプ3 30deg・12deg
流速 m/s	($d=47\text{mm}$, $L=450\text{mm}$)	($d_f=47\text{mm}$, $L=450\text{mm}$)	($d_f=47\text{mm}$, $L=450\text{mm}$)	($d_f=47\text{mm}$, $L=450\text{mm}$)
0.2	0.10 Pa ($\text{Re}=630$)	0.70 Pa ($\text{Re}=300$)	0.41 Pa ($\text{Re}=330$)	0.28 Pa ($\text{Re}=400$)
0.5	0.35 Pa ($\text{Re}=1600$)	4.60 Pa ($\text{Re}=760$)	2.00 Pa ($\text{Re}=830$)	1.32 Pa ($\text{Re}=1000$)
0.8	0.67 Pa ($\text{Re}=2500$)	10.20 Pa ($\text{Re}=1230$)	5.40 Pa ($\text{Re}=1330$)	3.50 Pa ($\text{Re}=1600$)

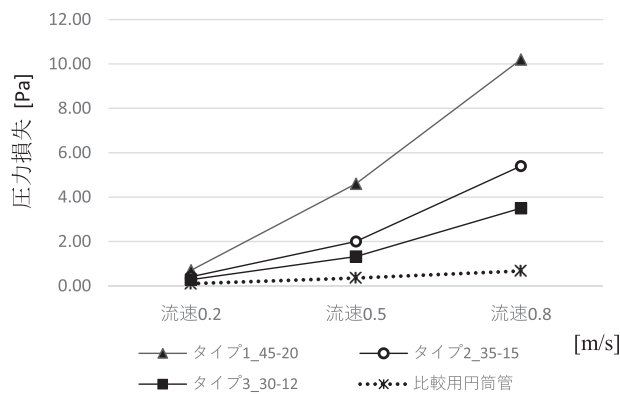


図8. 折り紙管路と比較用円筒管の圧力差比較

5. 折り畳み式筒状管路の流路としての評価

比較用円筒管路の圧力損失は、CFDの解析結果から0.10Pa (0.2m/s)、0.35Pa (0.5m/s)、0.67Pa (0.8m/s)であった。この値は一般的な圧力損失の実験式から予想される値とほぼ同一である。

小児に人工呼吸器を用いる場合の流速0.2m/sにおける比較用円筒管と折り紙管路三種類の圧力損失を比較した場合、比較用円筒管の圧力損失0.1Paに対して、タイプ1の圧力損失は0.7Paであり、比較用円筒管の7倍の圧力損失であった。タイプ2の圧力損失は0.41Paとなり、比較用円筒管の4倍の圧力損失であった。タイプ3は0.28Paとなり、比較用円筒管の3倍の圧力損失であった。

成人に人工呼吸器を用いる場合の流速0.5m/sにおける比較用円筒管と折り紙管路三種類の圧力損失を比較した場合、比較用円筒管の圧力損失0.35Paに対して、タイプ1の圧力損失は4.6Paであり、比較用円筒管の13倍

の圧力損失であった。タイプ2は2.0Paで比較用円筒管の6倍の圧力損失であった。タイプ3は1.32Paで比較用円筒管の4倍の圧力損失であった。

人工呼吸器を用いた治療において、高流量換気を実施する場合の流速0.8m/sにおける比較用円筒管と折り紙管路三種類の圧力損失を比較した場合、比較用円筒管の圧力損失0.67Paに対して、タイプ1の圧力損失は10.2Paであり、比較用円筒管の15倍の圧力損失であった。タイプ2は5.4Paで比較用円筒管の8倍の圧力損失であった。タイプ3は3.5Paで比較用円筒管の5倍の圧力損失であった。

管路へ流す流速を0.2m/sから0.5m/s、0.8m/sへ増加させるほど、圧力損失は大きくなることがわかる。これはDarcy-Weisbachの式より、流速の2乗に比例して圧力損失が拡大することに一致している。

人工呼吸器の一般的な流量0.5m/sの条件下にて、折り紙管路の圧力損失を比較した場合、タイプ1の圧力損失は4.6Paであるのに対して、タイプ2では圧力損失が2.0Paとなりタイプ1に比べて半減した。またタイプ3では1.32Paまでさらに圧力損失が低下した。比較用円筒管の圧力損失が0.35Paであることを考えるとタイプ3は、タイプ1に比べて大きく改善していることがわかった。

全般的に、折り畳み式筒状管路三種類の圧力損失は、比較用円筒管の3倍から15倍程度の大きな値である。管路において、この値が大きいことは性能が低下することを意味している。

これら圧力損失の原因は、主に折り畳みを実現するために犠牲にする管路断面積の減少と、折り目によって生じる凹凸の間に生じる渦による損失が原因と考えられる。

6. まとめ

数値流体力学 (CFD) の結果より、タイプ3 (30deg・12deg, 管路断面積915mm²) が、折り紙管路三種類中、最も圧力差が小さくなり、流路性能が優れていることが証明された。しかしその一方で、タイプ3は折り目同士が接近しすぎており、厚みができることで収納性が悪化した。タイプ1やタイプ2の折り畳み性能は良好で、畳んだ際の収納性も高い。

よって結果から導く結論として、折り紙管路タイプ1 (45deg・20deg, 管路断面積433mm²) は、圧力損失が大きく、流路として使いにくい。折り紙管路タイプ2 (35deg・15deg, 管路断面積452mm²) は、収納性が高

く、圧力損失はタイプ1より半減することから流路性能が改善している。そのため収納性と流路性能の観点から、バランスの優れた折り畳み式筒状管路（配管）であるといえる。

本研究では、折り紙工学を利用した折り畳み式ディスプレイ管路の実用化に向けた管路の性能を数値によって示した。得られた折り紙管路の性能は、まだ改善の余地があるが、今後も2次元展開図や紙（シート材）の改良によって、さらに圧力損失の少ない折り畳み式筒状管路の実現が可能になることが期待できる。

参考文献

- (1) 川名明彦, 三笠桂一, 泉川公一 2020「新型コロナウイルス感染症 (COVID-19)」日本内科学会雑誌, 109巻
- (2) 野島武敏, 萩原一郎 2018「折り紙の数理とその応用」共立出版株式会社
- (3) 舘知宏 2016「剛体折り紙メカニズム」Vol.34 No. 3, pp.184-191
- (4) 三谷純 2015「立体折り紙アート」日本評論社
- (5) 戸田和之 2008「境界条件の基礎と決定法」日本機械学会, [No. 07-131] 講習会教材, 39-50

(2023年11月7日受理)