

腹腔鏡下手術用サポート鉗子の開発

Support forceps for Laparoscopic Surgery

○ 荒木峻平(立命館大学) 野方誠(立命館大学)

Shunpei ARAKI, Ritsumeikan University
Makoto NOKATA, Ritsumeikan University

Abstract: In recent years, laparoscope surgery with single port is being carried out in various scenes for minimally invasive. Small diameter forceps is used for covering fault of this surgery that disable to approach to the many directions. However, small diameter forceps is not flexible because of its rigidity. The purpose of this research is giving flexibility to small diameter forceps using spring-link mechanism. Solidworks one of the CAD software used for designing springs. In this paper, the designing factors are length, thickness, and materials and decided with stress analysis. As a result, the most suitable parameters are decided that length is 100[mm], thickness is 0.3[mm], material is β -titanium(22V-4Al). In the future study, fabricating parts and demonstrating experiment are planned and improvement based on the result is needed.

Key Words: Laparoscope surgery, Spring-link mechanism, β -titanium

1. 研究背景

現在、低侵襲性を目的とした単孔式腹腔鏡下手術が行われている。この手術は臍部に直径約2~3[cm]の手術創を作り、術具を通して手術を行う方法であり、患者にかかる負担が小さいことや、手術痕が目立たず整容性が高いなどの利点が注目されている。一方で、この手術法は鉗子がアプローチできる範囲が限られてしまう欠点があり、それを補うために $\phi 2$ [mm]の細径サポート鉗子を腹部側面から挿入して、臓器の把持や生体物質の把持・牽引などのサポートを行う。しかし、このサポート鉗子も現段階では剛性が高く、可動範囲が限られているため、把持したい部分に鉗子が届かない場合があり、柔軟性が求められる。

2. 研究目的

本研究では導管部を能動屈曲させることのできるサポート鉗子の開発を目的とする。研究対象は鉗子の導管部であり、能動屈曲の原理には「ばね-リンク機構」を採用し、この機構に使用されるばね部分の設計を中心にを行い、 $\phi 2$ [mm]の細径サポート鉗子に導入する方法について考察を行う。

3. ばね-リンク機構⁽¹⁾

本研究では屈曲の原理として、ばね-リンク機構を採用する。この機構は荒田らによって手術用マニピュレータの駆動原理として考案されたものであり、板バネと剛体リンクを連結させた構造を持つ(Fig.1 (a))。屈曲の際はこの機構が2枚1組となって動作を行い、剛体リンクが長手方向にスライドすることによって、拮抗運動により、水平運動を屈曲運動に変換できる。(Fig.1 (b))。この機構は屈曲が滑らかであり、体内で生体組織を傷つけることがないため、体内での動作に優れている。本研究ではこの機構の原理を細径サポート鉗子に導入する方法を考察し、主に板バネ部分の設計を行うことによって、アプローチを行うこととする。

4. シミュレーションモデルの構築

本研究では、ばね-リンク機構のばね部分の設計を行うにあたり、SolidWorks上でばね-リンクのモデルを構築し、それを用いてばねの各パラメータを変化・屈曲させて比較検討を行うことにした。モデルは、ばね2枚、リンク2枚、

そして先端部に取り付けたエンドエフェクタの代わりとなる板1枚の合計5つの部品から構成される。ばね部分にはばねとしての性質に優れた β チタンを、リンク部分とエンドエフェクタには剛性に優れたSUS304を材質として設定する。リンク部分の上面と側面に、ローラ/スライダの拘束を適用することにより、リンクが水平方向にスライドを行えるようにしたうえで重力を設定し、さらに屈曲させるための荷重をリンク部分の根元に加える(Fig.2)。このモデルをシミュレーション上で動作させると、Fig.3のように先端部が屈曲する。本研究では、この先端変位の目標値を50[mm]と設定した上で、設計を行う。

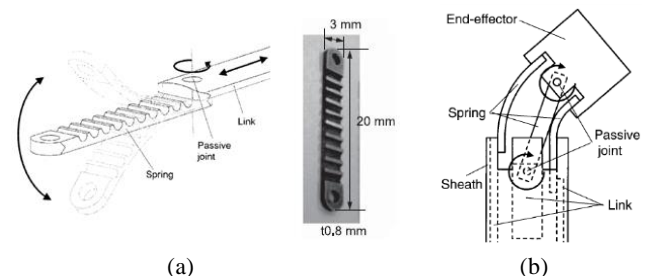
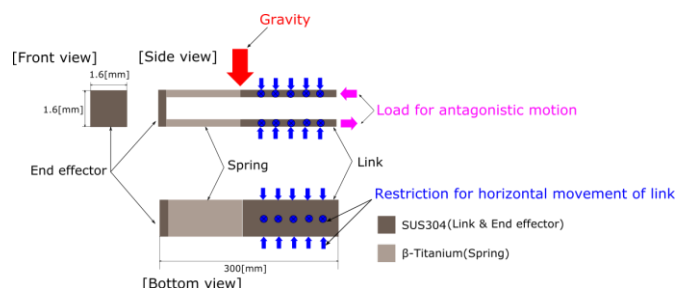
Fig.1 Spring-link mechanism⁽¹⁾

Fig.2 Model view

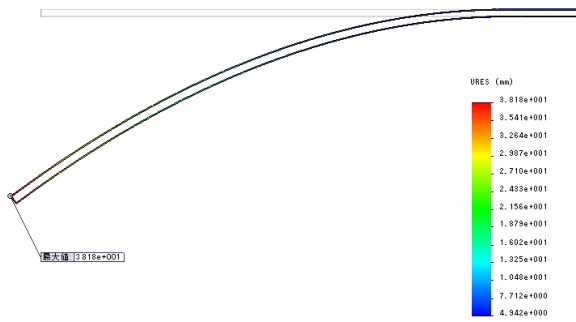


Fig.3 The state of bending motion

5. ばね長さの検証

ばね設計を行うにあたり、まずはばねの長さについて検証を行う。この検証では、より軽い荷重で目標先端変位を得るのに適した長さの検証を行うことを目的とする。

5-1 長さの検証方法

Fig.2 に示すモデル内で、ばね部分の長さを 60~100[mm] の間で 10[mm]間隔で変化させて比較検証を行う。リンク部長さはばね部と合わせて 300[mm]となるような長さ(180~240[mm])に変化させる。このとき、ばね部・リンク共に厚みは 0.2[mm]と設定し、ばね部の材質は 22V-4Al(JIS80種)のβチタンを用いることにする。屈曲させるための荷重の大きさは 1[N]と設定し、この小さな荷重で最も目標先端変位に近づく長さを模索する。

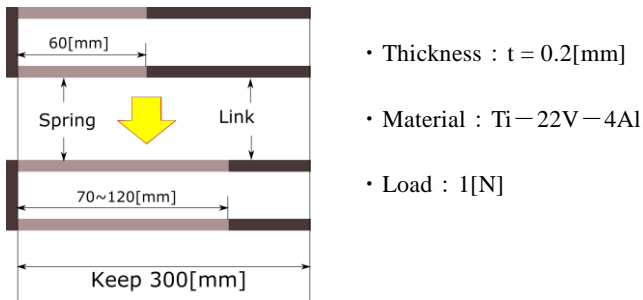


Fig.4 The way to inspection (Length)

5-2 長さの検証結果と考察

Table1 The result of inspection (Length)

L	60	70	80	90	100	110	120
σ_{max}	71.5	71.7	72.7	74	76.4	76.7	77.6
y_{max}	15.9	20.9	27.4	35	43.5	53	64.4
y_{og}	0.297	0.549	0.929	1.48	2.23	3.26	4.61

L = Length of spring, σ_{max} = Maximum stress,
 y_{max} = Maximum displacement of tip
 y_{og} = Maximum displacement of tip only gravity

Table1 に長さの検証結果を示す。ばね部にかかる最大応力は、いずれの長さにおいても、材料である Ti-22V-4Al の降伏応力 850[MPa]を大きく下回るため、屈曲時に塑性変形を起こす可能性は低いと考えられる。先端変位は長さ 100[mm]~110[mm]の間で目標たわみである 50[mm]に達し

た。しかし、同時に無荷状態の重力による変位が鉗子直径 2[mm]を上回っており、鉗子の操作性に影響すると考えられる。そのため、長さは目標たわみに近い 43.5[mm]のたわみを得られた 100[mm]とした上で、ばね厚さを変化させることで重力による先端変位を抑えることを考える。

6. ばね厚さの検証

ばねの厚みを大きくすることで、自重による先端変位を抑えることを目標に、ばねの厚さについて検証を行う。

6-1 厚さの検証方法

Fig.2 に示すモデル内で、ばね部分の厚さを 0.1~0.5[mm]の間で、0.1[mm]間隔で変化させて比較検証を行う。リンク部の厚さも同様に变化させ、ばね部長さを 100[mm]、リンク部長さを 200[mm]と設定し、導管部全長が 300[mm]になるようにする。材質、屈曲させるための荷重は長さの検証と同様である。

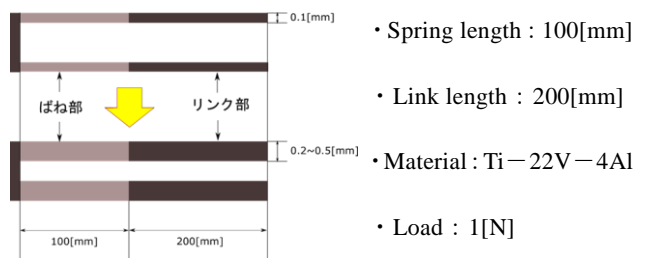


Fig.5 The way to inspection (Thickness)

6-2 厚さの検証結果と考察

Table2 The result of inspection (Length)

t	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
σ_{max}	300	76.4	33.7	19.1	12.3
y_{max}	363	43.5	12.3	4.98	2.43
y_{og}	9.22	2.23	0.982	0.55	0.351

L = Length of spring, σ_{max} = Maximum stress,
 y_{max} = Maximum displacement of tip
 y_{og} = Maximum displacement of tip only gravity

Table2 に厚さの検証結果を示すばね部の厚さが大きくなるに従い、ばね部にかかる最大応力は非線形的に減少していることがわかる。自重による変位も同様に変化していることが確認され、0.3[mm]以上ではサポート鉗子の半径である 1[mm]を下回った。しかし、それと同時に変位の減少量自体も大きく減少していることも確認された。このことから、鉗子導管部内の把持用ワイヤの動作領域を確保するためにも、厚みは 0.3[mm]に抑えるのが適していると考えられる。

7. βチタン合金の検討

前節において、ばね部の寸法を長さ 100[mm]、厚み 0.3[mm]と決定した上で、ばね部の材質として使用するβチタン合金の選定を行った。

7-1 β チタン合金の検討方法

β チタンの候補として、Table3に示した3種類の β チタン合金を採用する。先述した寸法のばねについて、その材質をSolidWorks上でこれらの β チタン合金に変更し、比較を行う。本検証は、長さや厚さの検証とは方法が異なり、拮抗運動に必要な荷重を増加させ、目標先端変位50[mm]に達することができた時点の荷重、ばね部の最大応力を確認する。その後、拮抗運動に必要な荷重を除荷して、モデルに重力のみがかかっている状態にすることで、重力による先端変位を確認する。

Table3 Physical properties of β -titanium

	22-4	15-3-3-3(ST)	15-3-3-3(STA)
E[GPa]	80	640~900	850 or less
σ_B [MPa]	80~92	703~945	689~869
σ_y [MPa]	101~109	1000 or more	965

E = Modulus of elasticity intension

σ_B = Tensile strength,

σ_y = Stress at yield

7-2 β チタンの検討結果

Table4 The result of inspection (β -titanium)

	22-4	15-3-3-3	15-3-3-3
F[N]	4.3	5	6
y_{max}	130	150	180
y_{og}	0.982	0.873	0.74

F = Force for bending motion

y_{max} = Maximum displacement of tip

y_{og} = Maximum displacement of tip only gravity

Table4に使用する β チタンの検証結果を示す。ばね部にかかる最大応力に関しては、いずれの β チタンも降伏応力を大きく下回っており、屈曲時に塑性変形を起こすことはないと考えられる。重力による先端変位に関しては、15V-3Cr-3Sn-3Al型のSTA処理を施したものが最も小さくなったが、目標先端変位に必要な力が5[N]を上回ってしまった。そのため、ばね部の材質としては、5[N]で目標先端変位を得ることが可能であり、重力による先端変位を1[mm]以内に収めることが可能な22V-4Al、もしくは15V-3Cr-3Sn-3Al型のST処理を施したものが適していると考えられる。

8. 結論

検証の結果より、ばね部長さは軽い力で目標先端変位50[mm]を得ることが可能な100[mm]、ばね部厚さは重力によるたわみを1[mm]以内に抑えることが可能で、なおかつ屈曲に大きな力を必要としない0.3[mm]とした。この寸法のもとで材質の検証を行ったところ、材質としては前提条

件である5[N]の荷重で目標先端変位まで達し、重力によるたわみを1[mm]以内に抑えることができる。Ti-22V-4Al、もしくはTi-3Cr-3Sn-3AlにST処理を施したものを採用するのが適切であると結論づけ、今回はTi-22V-4Alを採用することとし、ばね部の仕様が決まった。Fig.6に設計したばね-リンクの図を示す。

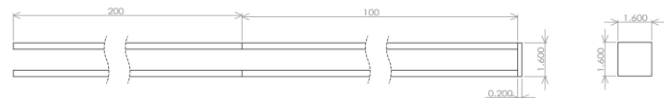
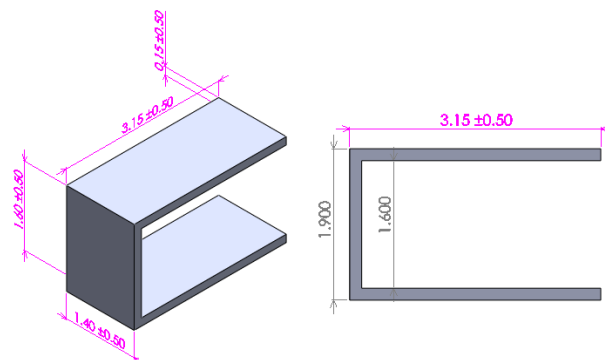


Fig.6 Design of Spring-link mechanism

9 今後の課題

今回設計したばね-リンク機構を実際に組み立て、その動作検証を行う予定である。実験では各部品をボンドを用いて接着して検証を行うが、各部品の寸法が小さいため、ばね-リンク間はそえ木を用いて接合を行い、先端部の板をコの字型にすることで、ボンドを塗布できる部分を設けた(Fig.7)。

部品形状変更後の先端変位は設計時と比較して約5.4%減少したが、スケールが小さく、加える荷重を4.3[N]から4.5[N]に変更することで目標たわみに達した。従って、屈曲性能に大きな変化がないと考え、これらの部品を組み立てて実際に屈曲試験を行い、その評価の元で改良を行う。



(a) Tip division after the change

(b) Bonding of spring and link

Fig.7 Change of the part shape

参考文献

(1) 荒田純平, 齋藤善崇, 藤本英雄, ばね-リンク機構を用いた外殻型2自由度屈曲マニピュレータの開発, 日本ロボット学会誌, vol.29, no.6, pp.523-531, 2011.