

切断時の血管損傷を抑制する医療用剪刀の開発

大阪大学 ○三部竜太郎 ◎佐竹うらら 榎本俊之

要 旨

外科手術における血管の切断では、血管が切断開始までに大きく変形することが避けられない。特に、脳外科や心臓血管外科の手術における剪刀を用いた血管切断時には、変形が深刻な損傷をもたらすことから、その抑制が求められている。本研究では、切断時の変形を抑制可能な剪刀の開発を目的に、切断条件が切断対象の変形挙動に及ぼす影響を検討した。検討結果をもとに新たな剪刀を開発し、切断実験によりその効果を検証した。

1. 緒 言

外科手術においては、血管や皮膚といった生体軟組織の切断の際に医療用剪刀が頻りに用いられる。脳外科や心臓血管外科で行われる血管の切断では特に良好な切断面が求められることから、「血管剪刀」と呼ばれる特殊な剪刀が広く用いられている⁽¹⁾。血管の切断では、血管壁の挫滅や血管全体のつぶれが手術の成否に強く影響し、実際に、浅側頭動脈-中大脳動脈吻合術においては、切断時の動脈のつぶれが術後の閉塞に繋がること指摘されている⁽²⁾。このようなことから、切断時の変形を抑制できる剪刀が求められているが、軟質材料の切断に関しては、従来、食品や生体軟組織を対象として数多くの研究が行われているものの⁽³⁾⁽⁴⁾、それらの多くは切断力に着目しており、切断時の変形に関しては不明な点が多い。

本研究では、切断時の変形を抑制可能な剪刀の開発を目的に、切断条件が工作物の変形に及ぼす影響を検討した。切断条件として、従来、重要なパラメータとして知られている「引き切り比」に着目し、血管を模擬した軟質なチューブ状工作物に対する切断実験によってその効果を検証するとともに、その効果を利用した新たな剪刀を開発した。

2. チューブ状工作物の切断特性

血管のような軟質なチューブ状工作物を切断した際の切断力および工作物の変形挙動を確認するため、剪刀による切断を模擬可能な装置を製作し、血管と同等の機械的特性を有するシリコンゴムチューブに対して切断実験を行った。図1に切断装置を、表1に切断条件をそれぞれ示す。切断装置は、2枚の刃（動刃、静刃）による剪刀の切断動作を模擬するため、動刃を模擬したメスと静刃を模擬したアルミプレートで構成し、ピボットを中心として動刃を回転させることで切断を行った。動刃と静刃の初期開き角は25°とし、動刃の回転速度はピボット周りに50°/secとした。医療用剪刀による切断特性を再現できるよう、メス（動刃）には、血管切断用として一般に用いられている医療用剪刀と同じ先端角と厚さを有するものを用いた。また、動刃の逃げを考慮して、アルミプレート（静刃）の中心部にスロートを設けた。静刃の下に設置した動力計により切断時の力を測定するとともに、切断点付近をハイスピードカメラで撮影して工作物の変形挙動を観察した。比較のため、チューブ状工作物と材質および直径が同じシリンダ状工作物も用意し、切断特性として、動刃の回転にともなう切断力（図1中のX方向とZ方向の合力）の推移と、切断が開始した際の動刃の回転角を評価した。

図2に動刃の回転にともなう切断力の推移と切断が開始した際の工作物の変形の様子を示す。チューブ状工作物、シリンダ状工作物ともに、切断が開始する、すなわち裂が発生するまでに大きな変形が生じた。切断が開始した際の動刃の回転角は、チューブ状工作物の場合は6.2°、シリンダ状工作物の場合は4.8°であり、チューブ状工作物の方が切断開始までに生じる変形が大きいことが確認された。

3. 引き切り比が切断特性に及ぼす影響

軟質材料の切断に関しては、工作物に対して刃を鉛直に押し込む動作（Push動作）に刃を引く動作（Slice動作）を組み合わせることで切断力および切断開始までに生じる変形を抑制できること、またその効果は引き切り比、すなわちPush動作の速度に対するSlice動作の速度の比を大きくするほど高まること知られている⁽³⁾⁽⁴⁾。そこで、剪刀を

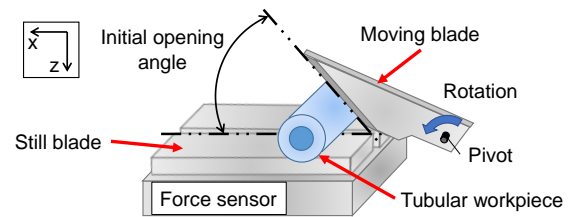


Fig.1 Schematic image of experimental apparatus

Table 1 Cutting conditions

Cutting tool(Scalpel)	
Type	Single straight blade
Thickness	0.38 mm
Blade wedge angle	30 deg.
Cutting parameters	
Rotational spd. of tool around pivot	50 deg./sec
Initial opening angle between moving and still blade	25 deg.
Workpiece	
Material	Silicon rubber
Shape	Tube and cylinder
Dimensions	Outer = $\phi 5$ mm Inner = $\phi 3$ mm length = 40 mm

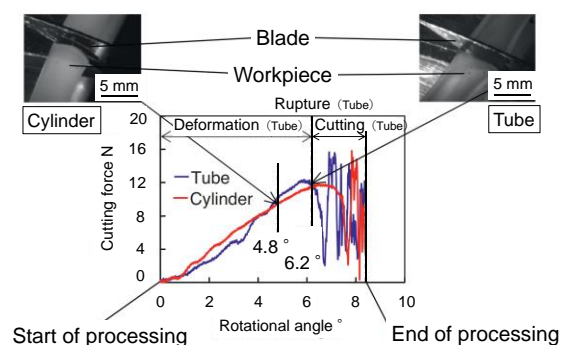


Fig.2 Cutting force and deformation of tubular workpiece

用いたチューブ状工作物の切断において、引き切り比が切断開始までに生じる変形に及ぼす影響を確認した。剪刀を用いた切断では、「動刃と静刃の初期開き角」および「ピボット位置」を変えることにより引き切り比を変えることができる。剪刀による切断における引き切り

比ξは、以下の式(1)と(2)または式(1)と(3)により表される。

$$\xi = \tan(\theta - \alpha) \quad (1)$$

$$\tan\alpha = [(2h + d + d\cos\theta)\sin\theta]/[(2h + d\cos\theta)(\cos\theta + 1)] \quad (2)$$

$$\tan\alpha = [\sin\theta(2h_2 + d + d\cos\theta)]/[2h_1 + \cos\theta(2h_2 + d + d\cos\theta)] \quad (3)$$

式中のθは動刃と静刃のなす角度、αは動刃の回転角度、dは工作物の直径、hは動刃および静刃のピボットからの距離、h₁はピボットから動刃の縁までの距離、h₂はピボットから静刃の縁までの距離である。式(1)と(2)により計算した初期開き角と引き切り比の関係、および式(1)と(3)により計算したピボット位置(図4中のPivot shiftの量)と引き切り比の関係を図5に示す。同図に示されるように、初期開き角が大きいくほど、およびPivot shiftの量が大きいくほど引き切り比は大きくなる。

引き切り比が切断開始までに生じる変形に及ぼす影響を確認するため、初期開き角およびピボット位置を変化させて切断実験を行った。図1の切断装置を用いて、ピボット位置を変更していない通常の場合とPivot shiftの量を5mmとした場合のそれぞれにおいて、初期開き角を三水準(10°、25°、40°)に変化させてチューブ状工作物の切断を行った。初期開き角と切断が開始した際の動刃の回転角の比を図6に示す。初期開き角が大きいくほど、およびPivot shiftの量が大きいくほど初期開き角と切断が開始した際の動刃の回転角の比が小さくなり、切断開始までに生じる変形が抑制された。以上から、剪刀を用いたチューブ状工作物の切断においても、引き切り比を大きくすることにより切断開始までに生じる変形を抑制できることが確認された。

4. 切断時の変形を抑制する剪刀の開発

剪刀を用いた血管の切断においては、引き切り比が大きいく剪刀、すなわち初期開き角およびPivot shiftの量が大きいく剪刀が切断時の血管の変形を抑制するのに有効であると考えられる。しかし、実際の手術では開き角が40°以上の剪刀を用いることは困難であり、一般に、初期開き角は25°以内が望ましいとされている。また、Pivot shiftの量を大きくすることは剪刀の大型化に繋がるため、脳外科や心臓血管外科の手術でPivot shiftの量が大きいく剪刀を用いることは困難である。そこで、剪刀の大型化をとまわずにピボット位置を変更した場合と同様の効果を得られる剪刀として、4節リンク機構を搭載した剪刀(図7)を開発した。4節リンク機構とすることにより、ピボット位置を変更せずにPivot shiftの量が大きいく状態、すなわち引き切り比が大きいく状態とすることができる。

図1の切断装置を用いて、開発した剪刀によりチューブ状工作物の切断実験を行った。初期開き角は25°とした。動刃の回転にともなう切断力の推移と切断が開始した際の工作物の変形の様子を図8に示す。比較のため、通常の剪刀を用いてチューブ状工作物を切断した場合の結果も示している。初期開き角と切断が開始した際の動刃の回転角の比は0.42となり、通常の剪刀を用いてチューブ状工作物を切断した場合(初期開き角と切断が開始した際の動刃の回転角の比0.74)に比べて切断時の変形を大きく抑制できた。さらに、通常の剪刀を用いてシリンダ状工作物を切断した場合(初期開き角と切断が開始した際の動刃の回転角の比0.57)、およびPivot shiftの量を5mmとした剪刀を用いてチューブ状工作物を切断した場合(初期開き角と切断が開始した際の動刃の回転角の比0.61)に比べても優位であることが確認された。

5. 結 言

剪刀を用いた血管の切断において、切断時の血管の変形を抑制できる剪刀を開発することを目的に、切断条件の一つである「引き切り比」が切断時の工作物の変形に及ぼす影響を検討した。「動刃と静刃の初期開き角」および「ピボット位置」を変えた剪刀を用いて血管を模擬したチューブ状工作物に対する切断実験を行うことにより、チューブ状工作物の切断においても、引き切り比を大きくすることで切断開始までに生じる変形を抑制できることを確認した。「ピボット位置」を変えることによる効果と同様の効果をもつ剪刀として、4節リンク機構を搭載した剪刀を開発し、通常の剪刀に比べて切断時の変形を抑制できることを検証した。

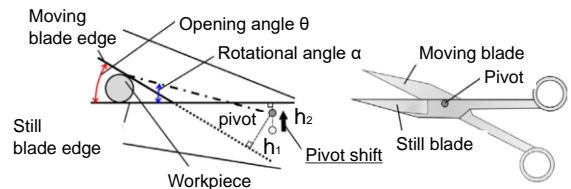


Fig.4 Shifting pivot position

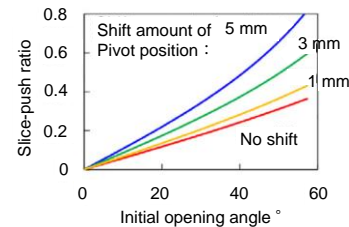


Fig.5 Slice-push ratio

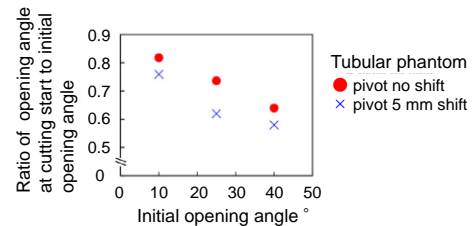


Fig.6 Ratio of the opening angle at the cutting start to the initial opening angle

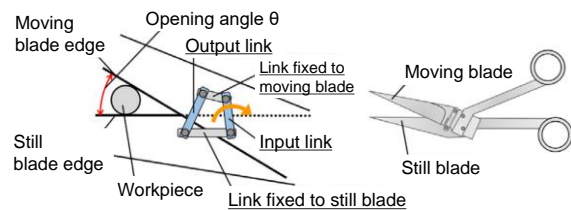


Fig.7 Proposed scissors using a four-bar linkage mechanism

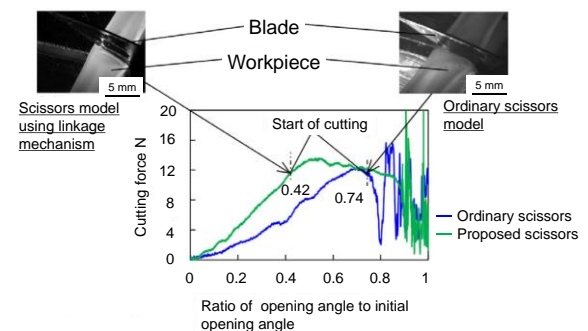


Fig.8 Cutting force and deformation of tubular workpiece using proposed scissors

参考文献

- (1) Belykh E. et al : Low-flow and high-flow neurosurgical bypass and anastomosis training models using human and bovine placental vessels: A histological analysis and validation study, *Journal of Neurosurgery*, Vol.125, (2016), pp915-928.
- (2) 野田伸司ほか: 吻合術における浅側頭動脈切断面の病理学的検討- 2 症例での検討-, *脳卒中の外科*, Vol.46, No.6, (2018), pp.445-448.
- (3) Z. Hu, et al : Cutting characteristics of biological soft tissues, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol.61, (2012), pp.135-138.
- (4) Atkins AG, et al : Cutting, by 'pressing and slicing,' of thin floppy slices of materials illustrated by experiments on cheddar cheese and salami, *Journal of Materials Science*, Vol.39, (2004), pp2761-2766.