

メカトロニック人工食道の開発

Development of Mechatronic Artificial Esophagi

鈴木 高 宏*

Takahiro SUZUKI

1. 人工食道の必要性

1.1 食道癌

食道癌は、日本では年間 10,000 人以上が罹患し、その頻度は胃癌の 8 分の 1 に達する¹⁾。特に、60 歳代をピークとして高齢者に多く、しかも男女比が 6 対 1 と男性に多い癌である。発生要因としては飲酒・喫煙・熱い飲食物の嗜好などの環境因子が強く関係し、特に飲酒・喫煙の双方を嗜好するとリスクが増大する。これらはアルコールや熱い飲食物が食道粘膜を傷害することによるものと解釈されている。

食道癌の特徴として、癌化部位が食道に近接するリンパ節に沿ってスキップ状に転移するため、その手術においてはしばしば食道全体の切除が行われる。食道の切除後には、新たに食物の通る道を再建する必要があるが、代替としては胃や大腸の一部を切除したものをを用いるのが一般的である。また頸部食道を切除した際などにはさらに小腸の一部を切除して用いる（遊離空腸吻合）こともあり、そのため図 1 のように広範囲の箇所の切開を要し、10 時間以上を要する大手術となることもしばしばである。よって、食道を人工物により代替した場合、食道再建のための切除を省くことだけでも手術時間の短縮と外科的侵襲の低減で大幅な低侵襲化を図ることができ、またそれだけでなく、比較的速やかに食物の経口摂取が再開できることで回復の早期化が期待できる。また、先述の遊離空腸吻合など様々な症例への適用可能性が広がるほか、食物の経口摂取を可能にすることから QOL (Quality of Life : 生活の質) の向上の面からも評価できる。

1.2 人工食道の開発研究

人工食道に関する研究としては、過去に人工血管と同様の材料を用いるなどの試みが行われているが、食道の蠕動機能がないために十分な成果を上げてはいない。最近の研究としては、食道細胞を培養・再生するバイオ人工食道の開発が挙げられる²⁾。これは、シリコンチューブの外側をコラーゲン層で被覆した二重構造によるものであり、生体親和性の

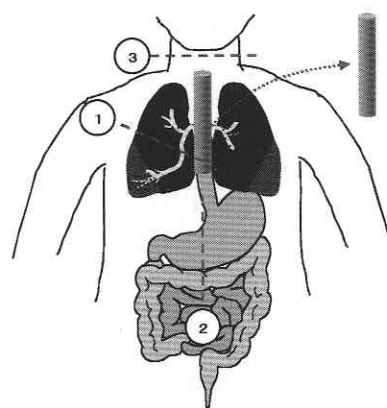


図1 食道摘出手術

高いコラーゲン層が食道細胞の生育の足場となる一方で、シリコンチューブによって力学的強度を保つことで狭窄等を防ぎ食道再生を促すものとなっている。なお、コラーゲンとシリコンとの親和性が低いことから、シリコンチューブは経口摂取の開始によって脱落して体外に排泄されるため、生体内に異物が残らないのも利点である。現状では動物実験で 5 cm 程度の再生に成功しているが、より長い領域での再生はまだ困難と見られるほか、粘膜層は再生したが筋層の再生は認められておらず、その点では先述した蠕動機能の欠如の問題がやはり存在すると思われる。

そこで、機械的に食道の蠕動機能を代替する運動機構を備えた人工食道の開発が必要と考えられる。そのような機械的機構を有する人工食道をメカトロニック人工食道と呼ぶこととする。

2. メカトロニック人工食道の開発

2.1 人工食道における要件

食道は、喉（咽頭）と胃をつなぐ長さ約 30 cm、外径 2 ~ 3 cm の管状臓器である。食道の最大にして唯一と言っ

*東京大学生産技術研究所 情報・システム大部門

てよい機能が、経口摂取した食物を胃まで送ることである。食物の嚥下は食道壁の筋層が蠕動することによって行われる。食道周辺には多くの重要な臓器が近接し、特に頸部付近で狭窄となっているため、人工食道においては非常にコンパクトな機構であることが要求される一方、胃に近い側においては空間的余裕が存在する。さらには心臓、肺、胃などによる大きな外乱に常時さらされていることから、簡素かつ頑健な運動機構であることが必要と考えられる。

また、人工臓器の材料として具備すべき条件としては、毒性がなく、生体親和性・血液適合性があること、また使用場所周辺との物理的・力学的性質の相違が少ないことが挙げられるほか、生体内移植物としては目的達成後に移植物が生体に温和に吸収されるか、または生体に一体化して異物感を残さないことが理想とされている。人工食道の材料としては、大腿筋膜、保存大動脈、凍結乾燥硬膜などの生体由来の材料と、天然ゴム、ポリエチレン、シリコンゴム、ナイロン、テフロンなどの高分子材料からなる二系統が考えられている。

以上のような要件を考慮すると、メカトロニック人工食道の機構としては、微小な機構を分散的に配置させたものよりも、アクチュエータ等の駆動部を胃付近に集中的に配置し、頸部付近など狭窄な箇所でも十分な食道内径が確保されるような機構が望ましいと考えられる。また他の理由として、ピエゾ等の素子の材料が生体適合性に劣ること、また現状ではトータルでの重量/トルク比を考えた時、マイクロアクチュエータより従来型のモータの方が未だ大きく勝っていることが挙げられる。

またこうした人工食道の用途としては、切除した食道の恒久的代替物としてだけでなく、先述のバイオ人工食道等と組み合わせることで食道再生までの経口摂取を補助し、食道再生後に機構の取り外しを行う、一時的な代替としての用途も考えられる。両者の違いは材料の選定や食道管部の設計等に関係するところだが、食物の搬送機構・駆動方式においては両者の本質的な違いはないと考えられるため、ここではその一方に限定はしない。

2.2 食物搬送機構の開発

図2は食物搬送機構の試験装置である。写真の向って左が口側、右が胃側であり、食道を想定した直径約3cm、長さ約25cmの透明な円管内に螺旋状の翼を配し、右側の駆動部によって螺旋翼を回転させることにより、食物の搬送を行う機構となっている。この機構の特徴として、管の中心軸付近が空いているため、正立時には重力によって食物が自然に落下するのを妨げず効率的に嚥下が行えることや、また螺旋翼の回転速度や回転方向を自由に変えることができるため、通常的口から胃への正方向搬送だけでなく、状況により逆方向への搬送も行えることが挙げられる。本装置において行った予備実験では固形からゲル状流動物な

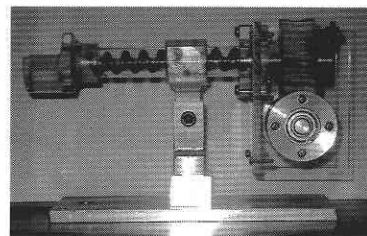


図2 食物搬送機構試験装置

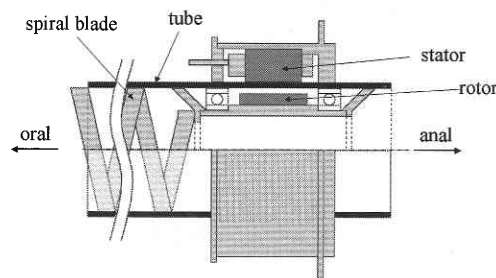


図3 食物搬送機構駆動部

どまでの様々な対象を水平状態でも搬送可能であることが確認できている。

図の試験装置では螺旋翼の回転を手動で行うために伝達機構の歯車が大きいため、駆動部全体が大きくなっているが、当然ながら実際にはモータによる駆動を考えている。図3は現在製作中のモータ部分の図である。DD (Direct Drive) モータを元に、ステータ部分を管外に、ロータ部分を管内に、食道管を挟み込む形で配置することでステータ・ロータが電磁的に結合している他は物質的には管内外の密閉性が確保され、駆動部周りでの隙間からの漏れ等の問題を根本的に回避できる。またDDモータを使用することで減速機を省略し、空間的・重量的にコンパクトな機構を実現することができる利点がある。

またこのように機構の開発を行うのと同時に、実際の食道は非常に柔軟であることを考え、そのような柔軟性の高い機構の動力学解析を現在行っている。ここに示した機構はあくまでメカトロニック人工食道を実現するほんの一例であり、他により優れた機構方式を考えることが可能である。このような動力学解析により人工食道に必要な力学的性質をより明らかにし、そしてその性質を踏まえ、また利用することで、新たな機構の開発につなげることが本研究の大きな目的であると言える。

(2001年2月9日受理)

参 考 文 献

- 1) 国立がんセンター:「各種がんの解説:食道がん」, http://wwwinfo.ncc.go.jp/NCC-CIS/pub/0_sj/010237_g.html, 2001.
- 2) 滝本行延, 清水慶彦:「人工食道」, 人工臓器 1994-95, 中山書店, pp. 226-229, 1994.