

Techno Scope



人にやさしい低侵襲医療を目指して

世界に先駆けて超高齢化社会を迎える日本では、医療技術の高度化に社会的な期待が高まっている。最近では、患者に負担を掛けない低侵襲医療を目指して、医工連携の取り組みが活発に行われている。医療機器の開発と、そこで使われる特徴ある金属材料に注目してみる。

患者の負担をできるだけ減らす「低侵襲医療」

最近、医療の現場でよく耳にする「低侵襲医療」という言葉がある。「侵襲」とは、手術や検査などに伴う痛みや発熱、出血など、患者の体に有害となる可能性のある行為を指す言葉だ。

医療行為のなかでも手術は最も大きな侵襲を伴う治療のひとつである。患者への負担をできるだけ減らそうと、最近では開口部を最小限に抑えて内視鏡を挿入し、画像を見ながら処置を行う腹腔鏡手術の研究が進んでいる。腹腔鏡手術は従来の開腹手術と比べて、体への負担が少ない。さらに術後の痛みが軽減される、術後の回復が早い、入院期間が短い、傷跡が小さい、のような利点生まれ、患者のQOL（クオリティオブライフ）を向上することができる。

今回は、低侵襲医療に貢献する医療機器のなかから、空気圧駆動を利用した手術支援ロボットと、形状記憶合金を利用したカテーテルについて紹介する。

空気圧を活用した手術支援ロボット

腹腔鏡手術は開口部が小さく、患者にやさしい手術だが、これ

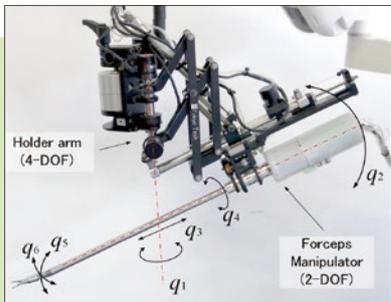
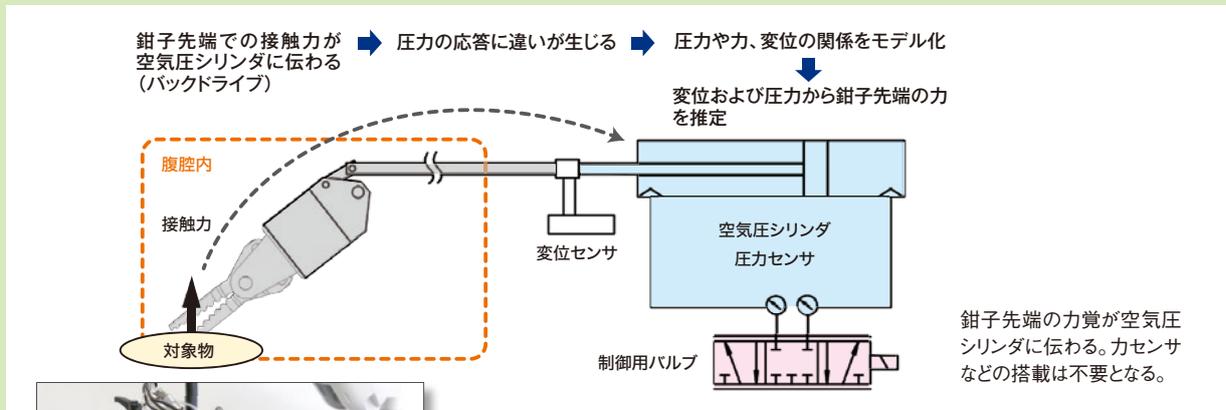
までは鉗子器具の動きが拘束される、操作性が悪い、視界が限られる、などの問題があった。そこで、これらの問題を解決する手術支援ロボットの研究開発が行われている。

手術支援ロボットの中でもよく知られているのがda Vinci(ダ・ヴィンチ)である。1997年に米国で利用開始されたダ・ヴィンチは、すでに全世界で導入されており日本でも200台以上(2015年)が稼働している。ダ・ヴィンチは、手術支援ロボットの多くが採用するマスタ・スレーブシステムを採用している。マスタとは医師が遠隔操作するコントローラ側を指し、スレーブとは患者の体内で動く鉗子側を指す。手術支援ロボットでは、医師は自分の手をマスタ側で操作することにより、スレーブ側の患者の体内であたかも自分の手がそこにあるように直感的に動かすことができる。しかし直接手で触れるわけではないので、鉗子にどの程度の力がかかっているかわからないという問題があった。このような感覚は「力覚」と呼ばれ、医師が力覚を感じられるような手術支援ロボットの開発が求められてきた。

東京工業大学科学技術創成研究院の只野耕太郎准教授は、鉗子に加わった力覚を医師にフィードバックする機構を検討した(図1)。

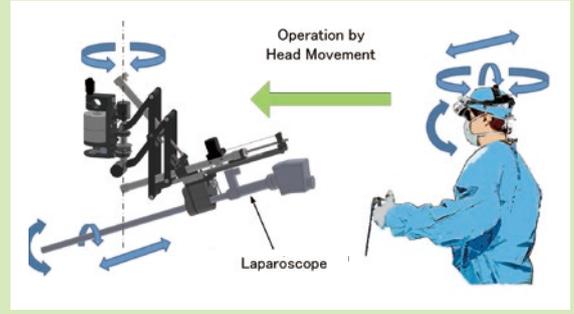
多くの手術支援ロボットシステムでは、精密な位置決めを実現するため、アクチュエータとして、電動モータに高減速比の減速

● 空気圧駆動によるマニピュレータのしくみ(図1)



スレーブアーム
鉗子本体及びワイヤには、滅菌に耐えられるSUS304などが使用される。

● 内視鏡操作システムにおける頭部運動による保持アームの操作(図2)



医師が頭部を動かすとジャイロセンサの角速度から目標位置が計算され、内視鏡の保持アームを動かすことができる。

(資料提供: 東京工業大学科学技術創成研究院 只野耕太郎准教授)

機を組み合わせたものを使用している。しかしこの方法では鉗子先端にかかる力覚を推定することが難しく、鉗子先端に力センサを取り付ける必要がある。ただしこの場合には、力センサを滅菌する必要がある、電気メスを使用するとノイズが発生する、などの問題が起こる。

そこで考案されたのが、電動モータに替わる機構として、空気圧アクチュエータの導入である。空気圧アクチュエータは、比較的大きな出力を出すことができ、減速機が不要となり、鉗子先端にかかる力覚を推定することができる。また空気の圧縮性があるので、柔らかな動作がしやすい。この機構を活用することによって、手術支援ロボットは、動作を精度よく制御できるようになり、患者の体内や臓器に柔らかく触れることができるようになった。

「手術はロボットが当たり前」の時代

空気圧駆動の技術を活用した、内視鏡操作システムが開発されている。これまで内視鏡手術では、手術を行う医師のほかに、内視鏡を操作する専門の医師(スコピスト)が必要であった。手術中に医師がある部分を見たい時は、スコピストに内視鏡で映す

箇所を言葉で指示していた。

開発された内視鏡操作システムは、スコピストの役割を担うもので、医師はジャイロセンサを頭部に付け、頭を上下左右に移動、回転することによって内視鏡の位置を操作することができる(図2)。

手術支援ロボットや内視鏡システムの今後について、只野准教授はこう語る。

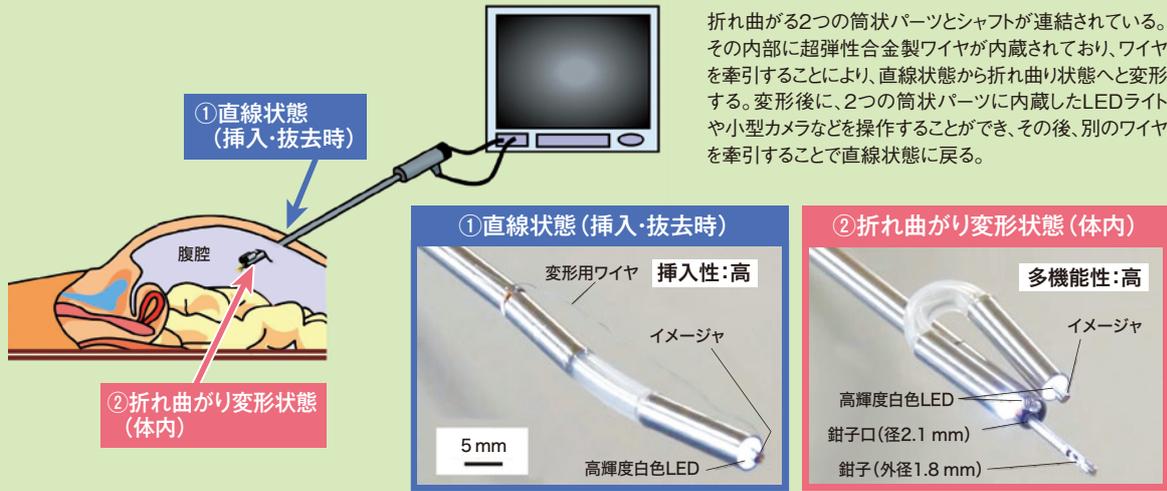
「最近ではいろいろな手術支援ロボットが開発され、手術領域も広がっている。IoTやAIなど、新しい技術を導入し「手術はロボットが当たり前」という時代が到来しつつある。現在取り組んでいるのは「体を切る箇所をできるだけ小さくする」という課題だが、一箇所だけに孔を開けるとか、すでにある孔を利用する、などの方法の検討が進んでいる」

機構の小型化、操作性の向上など、まだ解決すべき課題は多いものの、いずれ手術は「無侵襲」にたどりつくのかもしれない。

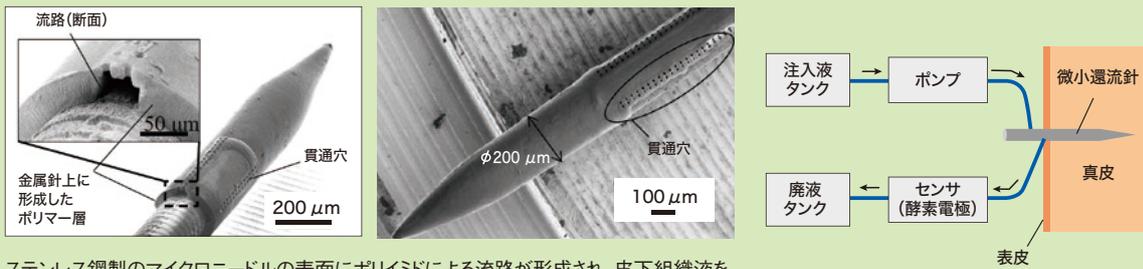
小さいことは、人にやさしいこと

著名な物理学者のファインマン(Richard Phillips Feynman)は、1959年に大学の講義で「小さな世界にはいろいろなチャンスが

● 超弾性合金ワイヤを利用した折れ曲がり変形型内視鏡(図3)



● マイクロニードルを用いた皮下組織液採取システム(図4)



ステンレス鋼製のマイクロニードルの表面にポリイミドによる流路が形成され、皮下組織液を流すことができる。

(資料提供: 東北大学大学院医工学研究科 芳賀洋一教授)

ある」と、微細加工技術の将来性について予言したそうだ。低侵襲医療の分野では、機器が小さいことは大きな利点となる。患者の体を大きく切り開かなくても、検査や治療ができる。内視鏡やカテーテルなどの医療機器もできるかぎり小型とすることで患者への負担を大きく減らすことができる。

東北大学大学院医工学研究科の芳賀洋一教授は、超弾性合金ワイヤを用いて、直線状態や変形状態に形状を変化させることができる内視鏡の機構を研究している。内視鏡やカテーテルなど索状デバイスの挿入性を確保するには細径であることが求められるが、細径になるほどデバイス自体の機能が制限される。挿入性と多機能化、高機能化を両立する一つの方法として、挿入および抜去時には直線状態であり、腹腔など比較的広い空間において折れ曲がり変形する機構を試作した(図3)。折れ曲がる2つの筒状パーツとシャフトから成り、体外から超弾性合金(ニッケルチタン合金)製のワイヤを用いて牽引することにより変形する。変形後に、2つの筒状パーツにより立体視をしながら鉗子を用いて作業でき、その後、直線化できることが、基礎的実験により確認されている。

MEMSの活用により今までにない医療機器を目指す

絆創膏に小さな針が付いている針付きパッチは、鍼灸と同じ効果が手軽に得られる商品である。使われる針はマイクロニードルと呼ばれる微細なもので、これを利用した皮下組織液採取システムが開発されている(図4)。

使われる針は、直径約0.2mmのステンレス鋼製の微細な鍼であり、表面にポリイミド*をコーティングして微細な流路を形成しておく。マイクロニードルを作るには、MEMS(微小電気機械システム)の微細加工技術が応用されている。

これを皮下組織にわずかに刺すと、ポリイミドによる流路に皮下組織液を流すことができる。皮下の血糖や乳酸などは血中の濃度と皮下の濃度がよく相関することが知られており、このシステムで計測すれば、採血をする必要がなくなる。たとえばアスリートは刻々と変化する乳酸値を測定することにより、トレーニングの

*ポリイミド: イミド(-CO-NR-CO-)結合を含む高分子化合物

医療に使われる金属材料と特性

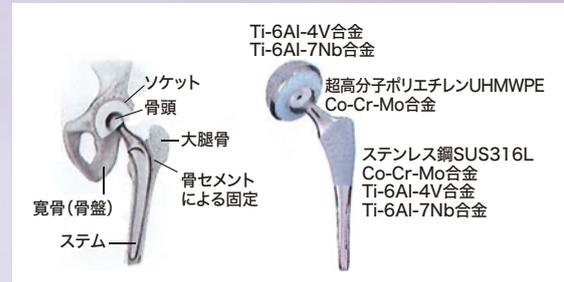
医療では、金属や樹脂、セラミックスなどさまざまな材料が使い分けられている。どんな材料にしても、滅菌ができることと生体適合性（生体組織や器官と親和性があり、拒絶反応などを起こさない性質）が良好でなくてはならない。さらに、使用される時間によって大まかに分けると、患者の体内で使用する時間が短いものと長いものがあるが、金属材料は両方の用途で使用される。

代表的な金属材料がチタン合金である。チタン合金は耐食性に優れており、Ti-6Al-4V ELIなどが多く使用される。しかしチタン合金はステンレス鋼に比べて延性が低い^{けいせい}ため、大きく変形すると破壊するおそれがある^{けいせい}結紮用ワイヤなどの用途ではステンレス鋼が使用される。

ステンレス鋼は靱性に優れ、古くから使用されているが、生体内は塩化物イオン濃度が高く、孔食やすきま腐食が起りやすい。主な鋼種はオーステナイト系のSUS316Lであり、整形外科などのインプラント（体内に埋め込まれる器具）、循環器系のステントなどに使われる。このほかにも、磁力固定の歯科磁性アタッチメントにフェライト系ステンレス鋼、ステープル針やボルトシャフトにSUS630が使われる。医療器具では、手術用メスにマルテンサイト系のSUS440、そのほか注射針やメスなどにSUS304が使われている。

コバルトクロム合金は、耐食性と硬さを調整したCo-Cr-Mo合金として歯科義歯に使用されている。また鋳造品は人工関節の骨頭に使われる。

形状記憶合金として知られるニッケルチタン合金は、超弾性効果を生かしてさまざまな用途に使われる。歯科のリーマ（根管治療用の器具）では、曲線部に柔軟に入っていくことができる。歯科矯正用ワイヤ、循環器の血管ステントにもニッケルチタン合金が使用されている。



人工股関節と使用される材料例

このほか、医療材料に関して以下のようなトピックスが挙げられる。

●表面処理による機能付与への期待

材料開発そのものではなく、材料に生体適合性を付与するために期待されるのが表面処理技術である。金属と骨は短期間では自然に接合しない。そこで金属の表面の形態を制御し、微細な凹凸や多孔質表面を形成する方法が用いられている。金属表面の凹凸や孔に生体組織が入り込むことにより一体化することができる。すでに、チタン合金製人工関節のステムの表面にチタンをプラズマ溶射する方法が、広く用いられている。

●MRIのアーチファクト対策

最近の話題として、MRI（磁気共鳴画像診断法）に適した材料研究が挙げられる。MRIは高精細な診断画像が得られ、全身の診断に多用されるようになってきている。もし磁気に反応する金属材料が体内にあると、金属が磁化してMRI画像にアーチファクト（計測した信号の中に混在するノイズ）が生じてしまう。そこでアーチファクトを抑制できる材料の研究が進んでおり、有望な材料として低磁性ジルコニウム合金が注目されている。

（資料提供：東京医科歯科大学生体材料工学研究所 塙隆夫教授）

効果がわかる。また糖尿病患者は血糖値の変化を測定することができる。

今後の低侵襲医療について、芳賀教授はこう語る。

「例えば、家の中にあるエアコンが壊れたとする。以前の方法では、家の外から乱暴に壁を壊して室内のエアコンを修理し、終わったら壁を塞いでいた。これに対して低侵襲医療は、玄関から家の中に入り、エアコンだけを修理して帰るようなもの。必要などころだけ治療することが可能になる。映画の「ミクロの決死圏」のように、体の中に入って検査したり治療するには、始めから微細加工技術を使った医療機器が使えようよ」

微細加工技術を生かした医療機器を研究する芳賀教授は、

医師としての臨床経験もあり、人に直接かかわる低侵襲医療機器にこだわった研究を続けていきたいと語る。

今後期待されるヘルスケア市場では、コンシューマー向けの医療商品も増え、一般の人でも新たな機能を持ったさまざまな機器を使用することが増えるかもしれない。

医療機器を取り巻く環境は大きく変化している。新たなニーズに応えるため、新材料や加工技術の貢献も期待されている。

●取材協力 東京工業大学科学技術創成研究院 只野耕太郎准教授、
東北大学大学院医工学研究科 芳賀洋一教授、
東京医科歯科大学生体材料工学研究所 塙隆夫教授

●文 杉山香里