

主論文の要旨

**A Mechanical Coil Insertion System for Endovascular
Coil Embolization of Intracranial Aneurysms**

〔 脳動脈瘤塞栓術用機械式コイル挿入システム 〕

名古屋大学大学院医学系研究科 細胞情報医学専攻
脳神経病態制御学講座 脳神経外科学分野

(指導：若林 俊彦 教授)

原口 健一

【緒言】

近年の医療における機器・ロボティクスの発展は目覚ましく、脳動脈瘤コイル塞栓術においてもこれを導入することでより効果的な治療ができることが考えられる。将来的にはコイル塞栓術の完全自動化が実現される可能性も十分に考えられる。コイル挿入にかかる力はその挿入が機械的に定速で行われた場合に小さく安定していることが報告されており、今回我々は機械式コイル挿入システムを開発した。またこれを使用することで、従来2人の術者により別々に行われていたコイル挿入とマイクロカテーテル操作を1人で同時に行うことができ、手術をよりスムーズかつ安全に施行できる可能性が考えられる。

【方法】

本システムの使用において、術者は両手でマイクロカテーテルを操作しつつフットスイッチによりコイル挿入操作を行う。コイル挿入および引き出しの機能を持つフットスイッチはアンプを介してモーターに接続されコイルデリバリーワイヤを前進・後退させる(Figure 2A,B,C,D,E)。我々は過去にコイル挿入力を測定し色・音階により提示する装置を開発しており、これを併用することで術者はデリバリーワイヤにかかる過剰な力を察知することができる(Figure 2F, 3)。

本システムを用い、シリコン製模擬動脈瘤に対する実験的コイル塞栓術を施行した。顕微鏡で模擬動脈瘤を撮影し、これをブラウン管モニタに接続して実際の手術で使用されるX線透視モニタを代用した。第一に本システムが術者の意図した通りに適切に動作するかを評価した。第二に本システムの有用性の検討であるが、これに関して定速挿入ではコイルデリバリーワイヤにかかる力が小さくなることは判明している中で、それに加えマイクロカテーテルやコイルの微細な前進・後退操作が必要であるかどうかを評価した。すなわち、①単純な定速コイル前進のみでマイクロカテーテルを操作しない方法、②マイクロカテーテルの用手操作を加えた方法、③さらにフットスイッチによるコイル停止・後退操作を加えた方法の3通りで実験的塞栓術を行いコイル挿入の成否、挿入力を点数化し比較した。模擬動脈瘤は直径5mmの球形で塞栓途中のものを想定して作成したが、これはコイルを留置していない空の瘤に対しては上記①～③の挿入法いずれにおいても容易にコイルを挿入できることが予備実験において判明したためである。コイルは8種類の大きさ・長さが異なるものを、模擬動脈瘤は2種類の塞栓率のものを組み合わせて使用し、コイルは通常の手術において同様の状況下で選択されると想定されるものを使用した。過去の実験において、術者の手による用手的コイル挿入では挿入力の最大値が概ね0.3[N]を超えないことが判明している。よって0.3[N]を超えずスムーズにコイルを留置できたものを2点、0.3[N]を超えたがコイルを留置できたものを1点、コイルやカテーテルが瘤から逸脱してコイルを留置できなかったものを0点とし、各コイルと瘤の組み合わせにおいて挿入実験を5回試行してスコアをt検定で比較した。

【結果】

実験的コイル塞栓術において本システムは問題なく動作し、1人の術者がモニタを注視したままマイクロカテーテルとコイルデリバリーワイヤを思い通りにコントロールすることができた。

コイル挿入法の比較実験では、塞栓率25%の模擬瘤に対しコイル GDC Ultrasoft 3mm-6cm (コイル2次径・コイル全長で表現)を挿入した場合、コイルが過小であるため挿入法にかかわらずスコアの平均点は2点であった。同様にコイルが瘤の残存容積に比較して過小・過大であるときはどの挿入法でも同等の成績であった。一方、塞栓率25%の模擬瘤に対しコイル GDC Ultrasoft 4mm-8cm を挿入した場合、単純な定速コイル前進に比べマイクロカテーテル操作を追加した挿入法では有意に高いスコアが記録された。さらにコイル GDC 2D soft 5mm-10cm を挿入した場合はマイクロカテーテル操作併用でもスコアが低く、これにフットスイッチによるコイル停止・後退操作を加えることで有意に高いスコアとなった。すなわちコイルの2次径・長さが瘤の残存容積に対し適切であるが挿入に工夫を要すると考えられるとき、多くの場合条件②は①よりも、さらに条件③は②よりも有意に高いスコアとなった(Figure 4)。以上より本システムを用いることで、より2次径が大きく長いコイルを小さい力で充填することができ、安全かつ有効な塞栓術を施行できる可能性があると考えられた。

【考察】

定速での機械的コイル挿入にかかる力は過去の報告において用手的挿入と比較され、また定速挿入の速度による比較もなされている。それによると用手的挿入は術者の手により前進・停止が繰り返されるため最も挿入力の変動・平均値が大きく、速度の遅すぎる定速挿入もまた力の変動が比較的大きくなるとされている(Figure 1)。これは静止摩擦力が動摩擦力よりも常に大きいためであり、ある程度の速度での定速挿入により動摩擦状態を保持することでコイル挿入力を低く保つことができると考えられている。

本システムの特長として一人の術者がコイル・マイクロカテーテル両者の操作を同時に行える点が挙げられる。従来これらの操作はそれぞれを別の術者が操作していたが、経験・能力や考え方の差により動きを同調させることが困難なことが多く、これを克服しうるのは大きな利点と考えられる。従来より1人で両者の操作を行っている施設もあるが、各々片手の操作では両手での操作に比べ動きが不安定になりやすく、安全な手術の遂行を考えると適切ではない可能性がある。

臨床応用を考えると安全性は最も追求されるべき前提事項であるが、これに関し本システムは緊急時には即座に従来の用手的コイル操作に移行できる構造となっており、また今後挿入力過大時の挿入動作自動停止機能を追加する予定である。将来的にはマイクロカテーテル操作を含め手術の完全自動化を目指すものであるが、今回の実験から現システムの段階では用手的操作の併用が不可欠であると考えられる。

【結語】

脳動脈瘤塞栓術用機械式コイル挿入システムを開発し、*in-vitro*での初期実験を行った。本システムを用いることで、一人の術者が安全かつ有効な手術を遂行できる可能性がある。本システムを用いた手術では、術者の用手的マイクロカテーテル操作とフットスイッチによるコイルコントロールが必要であると考えられる。