

機関番号：31201

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20700383

研究課題名 (和文) コアンダジェット制御を利用した多目的外科切開器具の提案と開発

研究課題名 (英文) Suggestion and development of multipurpose surgical incision device with Coanda effect induced by micro water jet

研究代表者

小松 真 (KOMATSU MAKOTO)

岩手医科大学・共通教育センター・講師

研究者番号：40347886

研究成果の概要 (和文) : コアンダ効果を伴う放電駆動マイクロウォータージェットの軟組織切開に対する性能評価を行い, 多目的な外科的切開装置の提案を試みた. その結果, 水中放電により直接ジェットを安定駆動する条件を特定し, それが切開に適した性能を持つことを確認した. また切開時の血管等の組織保存に関わるコアンダ効果について, 円柱硬組織に対しその効果が出現する接触角度の範囲を大域的に特定した. 以上により切開過程の部分的な評価と, 広いレンジにわたり強さを調整する方法の確立ができたことで, 多部位に適用できるジェットの発生方法を提案できた.

研究成果の概要 (英文) : Investigation on dissection growing in soft artificial tissue made of Polyacrylamide gel was carried out with micro water jet driven by spark discharge, and we tried to suggest multipurpose surgical knives inducing the dissection by the jet. As results, we could obtain conditions to produce the stable water jet with underwater spark, and the jet was suitable to apply to incision equipment. And about Coanda effect related to preservation of harder tissues like blood vessels in incision process, range of contact angle bring the effect to disk hard tissue was identified approximately in present studies. From these results, we can evaluate dissecting process under several conditions, and suggest jet generator for multipurpose incision with wide adjust range of the jet strength.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：医用生体工学・生体材料学

キーワード：医工学, ウォータージェット, コアンダ効果, 流体, 水中放電, 誘電体

1. 研究開始当初の背景

マイクロウォータージェットを外科用切開装置に適用した場合, 非観血的な切開が可能であり, ジェットをパルス発生させることで, 使用水量の低減と切開後の良好な視野の確

保が可能になった. この現象の最重要原理がコアンダ効果であり, ジェットが硬い組織と軟らかい組織の境界面に沿って進展し切開を行う. この軟組織中のコアンダ効果の現象の詳細や切開能力に関しては具体的なデータが少なく, その立証と詳細の解明は不十分

であった。これらの説明は安全性の確立と適用範囲の拡張において重要であり、コアンダ効果に関する基礎データの蓄積と、それを反映できる装置の試作が必要である。以上より、本研究では血管等を模擬した比較的硬いゲルを軟ゲル内部に含む模擬組織を作成し、その模擬切開実験を通し、ジェットの高さ・ゲル強度・ゲルの大きさ（太さ）が及ぼす影響を調べ、切開過程について定性評価する。

2. 研究の目的

本研究ではジェットの強さ調整のみで人体の多くの部位に適用できる、非観血的な外科用切開装置の提案を目的とする。直径 0.2～4.0 mm の血管等を保存することを想定し、ポリアクリルアミドゲル（以下、アミドゲル）を用いて、比較的硬組織である血管を軟組織で囲む形の生体模擬組織を作成する。同時にこの条件で切開に適する 5～30 m/s 程度のウォータージェット発生装置を試作し、前述の模擬組織を切開する *in vitro* 実験を行う。ジェットの強さとゲル強度、ゲルのサイズを変化させ人体の種々の部位に対応する模擬組織を作成し、各部位において軟組織の切開が効率的に行え、かつ硬組織が保存されるジェットの強さ、ならびにコアンダ効果の規模と特性を明らかにする。これにより、本方法の外科切開に対する性能評価と制御性、安全性に関し具体的なデータで示し、結果的に多くの部位に対応しうる切開装置を提案することを本研究の目的としている。

3. 研究の方法

(1) アミドゲルの濃度とヤング率の関係

本研究では高速度可視化の観点から、透明で人体組織の硬さに比較的近いとされるアミドゲルを模擬組織の材料として採用した。そのため、実験に先立ち機械的性質を計測した。本研究では粘弾性は考えないものとし、ヤング率だけを計測した。計測方法は金属球をマイクロメータ先端に取付け、試料となるゲルの上から押し付け、変位と荷重の関係からヤング率を簡易的に求めた（図 1）。計算には Hertz の式を用いた。

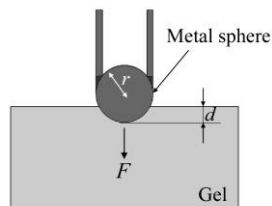


図 1 アミドゲルのヤング率計測法概略図

(2) 放電駆動方法の選定と切開性能

放電電極形状は予備実験にて、耐久力・安定

度・簡便さの面で優れると判断された棒一管電極間を採用し（図 2）、火花放電でジェットを発生させた。本研究では、

- ① 空中火花放電による衝撃波を電極前方の水と干渉させジェットにする手法
 - ② 水中放電でジェットを発生する方法
- の 2 種が考えられたため、圧力計測と高速撮影によるゲルの切開能力の 2 点についてそれぞれ計測し、より適切な方法を選択した。今回はノズル径を 2 mm に固定し、圧力はノズル前方 1.5 mm の位置に圧力シート（富士フィルム、LLLW）を置き、その変色を画像解析（FPD-100）して計測した。ゲルには 6% W/V アミドゲルを用い、4000 Frames/sec にて高速撮影（FOR-A, VFC-1000）し、画像解析による 2 値化（NIH Image）にてジェットの貫入を計測することで、ノズルをゲル表面に接触させている場合のジェットの切開能力の評価を行った。

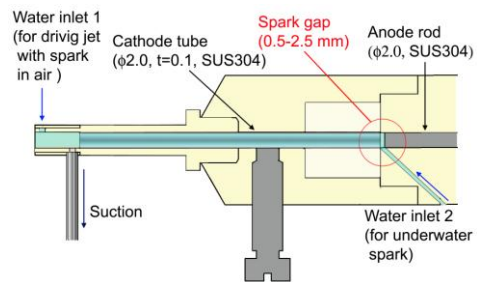


図 2 棒一管電極断面図

(3) 硬いゲル壁面のコアンダ効果による切開とその有効接触角度

円柱硬組織（血管等）－軟組織（周辺組織）の模擬組織をアミドゲルで作成（図 3）し、高速撮影で切開過程を捉え、コアンダ効果の可視化を行うとともに、(1)の切開性能評価時に得られたデータと比較し、コアンダ効果による切開の直進阻止作用について計測した。硬組織と軟組織はそれぞれ 10% W/V アミドゲルと 6% W/V アミドゲルで作成し、硬組織の直径は 3 mm と 6 mm の 2 種を用意した。またゲルをノズル（兼、電極カソード）の法線方向に対し 0 - 45 deg. の範囲で傾け、ジェットの貫入性能の変化を観察した。観察・計測方法は上記と同様高速撮影を用いた。

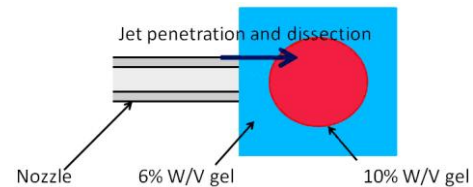


図 3 円柱硬組織－軟組織の模擬組織

4. 研究成果

(1) アミドゲルの濃度とヤング率の関係

アミドゲル濃度の増加に伴い、ヤング率は 2

次関数的な増加を示す結果となった (図 4)。これは一般的なアガロースゲルやゼラチンの、濃度とゼリー強度の関係とほぼ一致した傾向である。また強度測定に使用したアミドゲルの試料は、形状・作成法ともに切開性能を調査する際に用いるものと全く同一プロトコルであるため、この結果はそのままジェットの切開性能評価に用いることができた。この方法は九州大学先端研などで簡便な手法として提唱された計測法だが、本手法が本研究にも十分適用でき、安価にゲルの機械的性質を見積もることができることを示した。なおこのうち、扱いやすさなどの観点から軟組織として 6%W/V (約 8kPa)、硬組織として 10%W/V (約 43kPa) のアミドゲルを用いることとした。

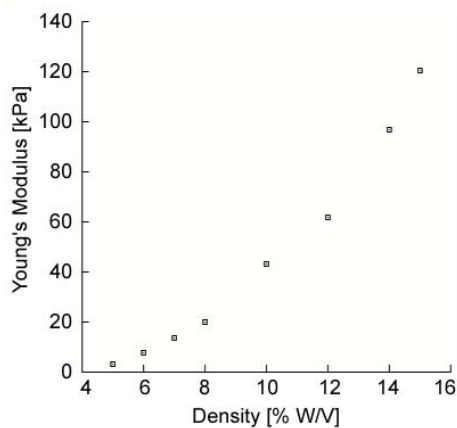


図 4 アミドゲル濃度とヤング率の関係

(2) 放電駆動方法の選定と切開性能

① 空中火花放電による衝撃波を電極前方の水と干渉させジェットにする手法
放電電極周りの幾何形状を決定するため予備実験を行った結果、電極間距離 2.0 mm, ノズル全長 40 mm, ノズル径 2.0 mm の条件を採用した。この方法では放電電極前方に常に水 (精製水) を配置する必要がある。吸引が必須となる。本研究では吸引のみでゲルが破碎されないよう、供給流量 25 ml/hr, 吸引圧 -0.40 MPa の条件で水をノズル内に常駐させた。また繰り返しに対する耐久度を同時に計測した。その結果、上記条件で計測された平均荷重 (平均圧力×有効面積) は最大 3.4 N (図 5), 6% W/V アミドゲルに対する平均貫入は最大 1.45 mm であった。また本ジェットはパルスジェットだが、5 パルス以内で切開することはなく、30 パルス前後の作用回数が必要だった。

② 水中放電でジェットを発生する方法
①と幾何学的に同条件では電界強度の問題で放電しないため、電極間距離のみ 0.75 mm

に縮めた。その結果、強いジェットと深い貫入が得られ (図 6), 計測された平均荷重は最大で 8 N 以上となった (図 7)。実際にはスケールオーバーしてしまったので、今後正確に計測し直す必要がある。また 6% W/V アミドゲルに対する平均貫入も 5 パルス以内で 8 mm を超えた。10% W/V アミドゲルの場合でも 7 mm を超える結果となった (図 8)。なお 5 パルス以内で確実に切開され、6% W/V アミドゲルに対し 8.3 mm, 10% W/V アミドゲルに対し 6.2 mm の切開を得た (図 9)。

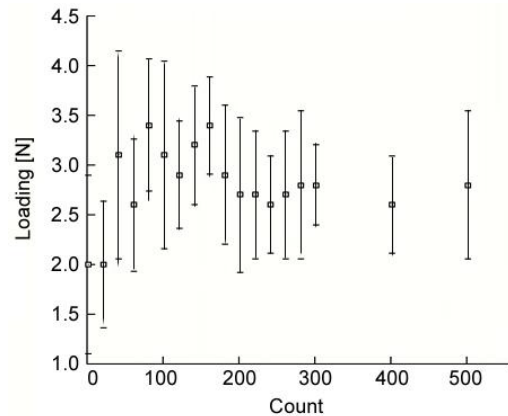


図 5 ジェット作用回数と作用荷重の関係

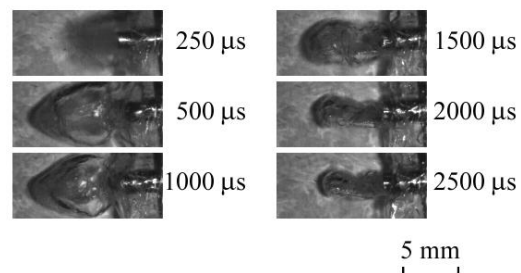


図 6 6% W/V アミドゲルへの貫入一例

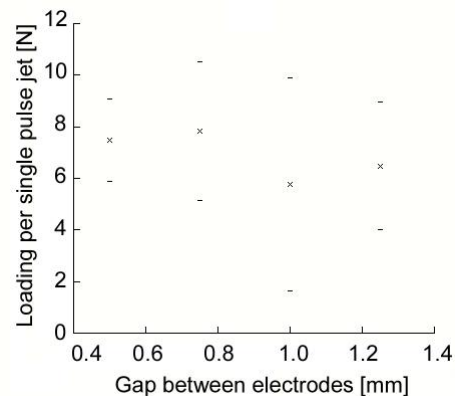


図 7 電極間距離と作用荷重の関係

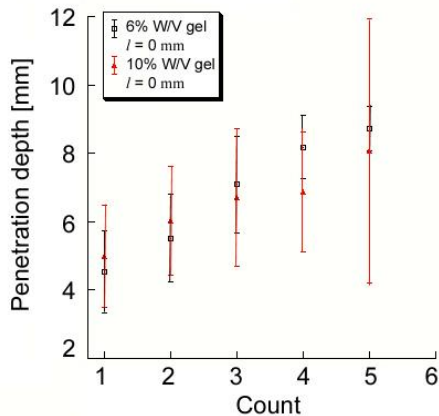


図8 ジェット作用回数と貫入深さの関係

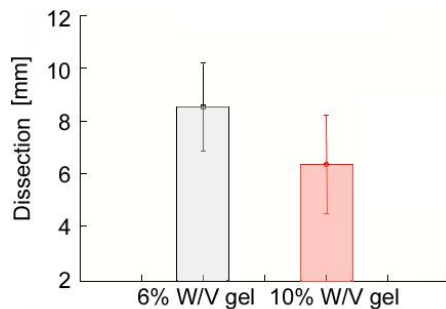


図9 ジェット5パルス作用後の切開深さ

以上、切開については水中放電駆動のほうが、ジェットの強さ・切開成功率のいずれにおいても①に比べ大幅に有利であるという結果となった。また誘電率や水量、電極間距離を変化させることにより威力を容易に変えることができるという結果も得られているため、ジェットの調整が容易に行える可能性は極めて大きい。

本方式では温度上昇はほとんど見られないが、電極間距離が1 mm以上になると火花遅れの確率が大きくなり、放電に失敗する場合が出てくる(図10)。この場合、失敗後に過剰な威力のジェットの発生や温度上昇(例として23 → 68 °C)などがしばしば見られている。このケースでは、波形にトリチェルパルスが見られたのちに放電することが多く、絶縁破壊まで発展するのに時間がかかっているものと推定している。この場合電極の破損を引き起こすケースを想定する必要がある。よって1 mm以上の電極間距離の設定は好ましくないと考えられる。

なお、現段階では水は1パルスごとに間欠的に供給されているが、本原理であれば連続的な供給に発展させることは十分可能であると想定している。ただしその場合は電極の耐久性や、表面のコンディショニング、冷却に関して今回とは異なる現象の発生も想定する必要がある。

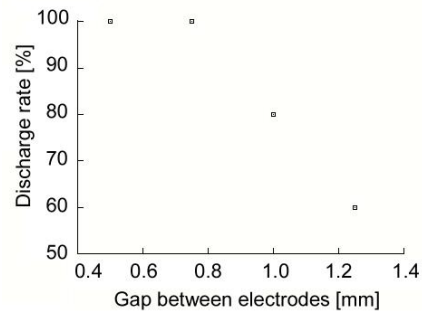


図10 電極間距離-放電率の関係

以上比較して、放電方法としては水中放電により直接ジェットを発生する方法を選択した。これによりジェットの強さが強く、威力調整も容易となるため、かなり広い威力レンジへの適用が期待できる。これは目的内の“多くの部位に対応しうる切開装置の提案”について一定の結果を残したものと考えられる。なお本実験により電極間距離は0.75 mmがかなり安定に放電出来る条件であると考えてよく、適切に運用できる条件を見つけられたことも成果としては大きい。今後さらなる調査で、この原理を実用に直接的に適用させることもできると考えており、他分野への応用も考えられる。

(3) 硬いゲル壁面のコアンダ効果による切開とその有効接角度

放電条件は(2)で安定していると判断された電極間距離0.75 mmとし、精製水を電極へ導入して水中放電にてジェットを生成した。高速度撮影結果より、硬組織直径が6 mmの場合、壁面に沿って水流が進展していることが視覚的に確認でき(図11)、コアンダ効果により亀裂進展があったものと考えられる。ただし本条件では硬組織を貫通してしまう事例も多く、より詳細に調べるためにはジェットを調整して、より弱い噴流で精査する必要がある。特に直径3mmの場合、本実験の全事例について貫通切開してしまった。

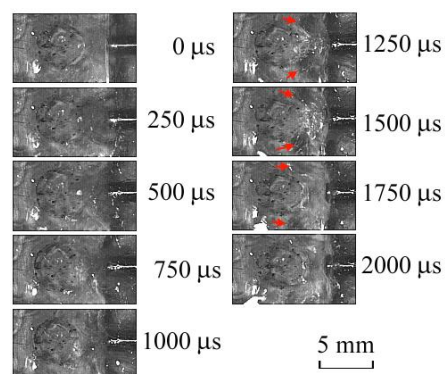


図11 10%W/V 円柱ゲル周りの6%W/V ゲル内を進展する水流(矢印が水流先端)

ただし、10%W/V のみの模擬組織に対するジェットの貫入と、10%W/V - 6% W/V の模擬混合組織への貫入を比較してみれば、模擬混合組織に対する貫入のほうが 10% W/V アミドゲルに対する貫入よりもおよそ 10~20 %程度小さく (図 12)、切開に対して同様の結果となった。これは硬組織と軟組織の境界面があることにより、境界面に沿った噴流の発生にエネルギーが使われたため、ジェットの方向への貫入が小さくなったものと推定している。そのため、この結果もコアンダ効果に起因するものと考えられる。

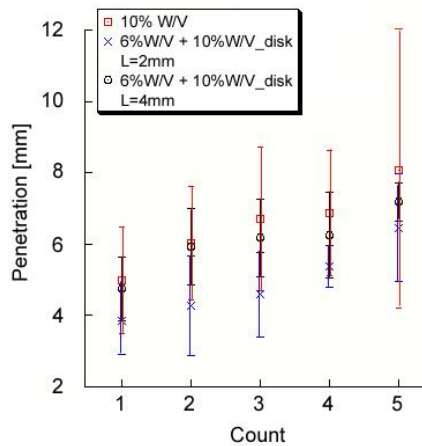


図 12 6%W/V-10%W/V 混合組織に対する貫入深さ

一方、10% W/V のみの模擬組織を傾けジェットを作用させたところ、ジェットの法線方向に対し 20 deg. まではそのまま直進して貫入・切開が行われたものの、45 deg. では貫入こそしたがその深度は浅く、少なくとも試行回数 5 回では切開は全く行われなかった (図 13)。現象としては、ジェットがゲル表面に沿って進展しつつ貫入したのち、ゲル表面に対しほぼ垂直に水流が反射する様子が捉えられた (図 14)。これにより、平面についてコアンダ効果が表れ始める傾きは、法線方向に対し 20 - 45 deg. の間にあると解釈することができる。前述の直径 6 mm の硬組織に対しても、接触角度もこの範囲に一致する部位でコアンダ効果が表れているものと思われ、実際に 20 パルス以内の反復回数では、接触角度 70 deg. 以上まで水流が進展した事例はなかった。これまでのマイクロジェットの事例で血管がよく保存されていた原因は、ハンドピース等を操作する際の傾き角度が、上記範囲近傍に存在したためと考える。なお別の研究にて、生体組織やそれに準ずるソフトマター・ゲル等の振動付加による接着において、その程度は表面処理や接着表面の水の吸着の度合いに依存するという報告があるが、これは本研究にも関与する内容も含まれる。つまり作用表面の水の吸着に依

存するスリップの度合いも今後考慮にいれる必要があると思われる。

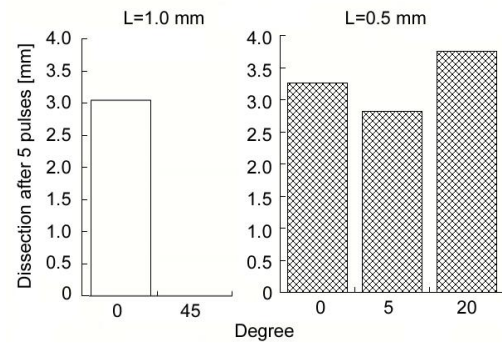


図 13 ゲルの傾きと切開深さの関係

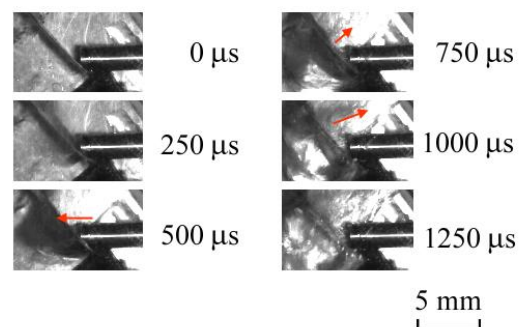


図 14 傾き 45 deg. の 10% W/V アミドゲルの表面を反射する水流 (矢印がジェット先端)

以上の結果から、ある硬い組織を貫通する威力をもったジェットでも、コアンダ効果により角度次第では貫通しないが、その角度はジェットの法線方向に対し 20 - 45 deg. の間にあることを明らかにした。これは安全管理には重要な指針であり、ジェットを微小制御していくときなどに考慮すべき内容であろう。なおこれは 2 mm ノズルのジェットを 6 mm の 10% W/V アミドゲルに作用させた場合の議論であり、パラメータ各種の値によりその角度は変化する。特にノズル径は大きさを小さくすれば、より細かい組織にも対応できる可能性が大きく、今回保存できなかった 3 mm 以下の組織にも対応できると考えられる。ただしその場合はジェットの強さの調整レンジが狭まる可能性もあり、今後要検討である。以上全体をまとめると、切開過程についての定性評価に関しては、部分的な結果ではあるもののコアンダ効果の表れる角度について明らかにした。結果的に本研究で最も特筆すべき内容は、威力の強いジェットを発生できる放電方法とその条件を見つけることができたこと、ならびにジェットの強さを広いレンジにわたり調整出来る方法において、おおきな知見を得たことである。本方法はエネル

ギー効率やコストパフォーマンスの上でも優秀であり、原理はそのまま実用に応用しうると考えている。本研究の目的のうち”多くの部位に対応しうる”の部分を満たせる提案ができたことが最大の成果である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

小松 真, 対向する円柱-円筒電極間の水中火花放電による水噴流の安定化と画像計測, 岩手医科大学共通教育年報, 査読無, 43, 2008, 17-23

小松 真, 佐藤 英一, 高山 和喜, 棒-管電極水中火花放電による噴流駆動の基本特性, 平成 21 年度電気学会全国大会講演論文集, 査読無, Issue 3, 2009, 43-44

小松 真, 模擬生体組織切開時に使用する実験材料の物理量計測法, 岩手医科大学共通教育年報, 査読無, 44, 2009, 15-24

小松 真, 棒-管電極水中火花放電による噴流駆動の基本特性, 平成 22 年度電気学会全国大会講演論文集, 査読無, Issue 3, 2010, 26

小松 真, ポリアクリルアミドゲルへ貫入する微小ウォータージェットを駆動する放電電極形状の最適化, 岩手医科大学共通教育年報, 査読無, 45, 2010, 1-9

小松 真, 空中火花放電による水噴流生成時の管-棒電極の耐久性, 平成 23 年度電気学会全国大会講演論文集, 査読無, Vol. 3, 2011, 25-26

[学会発表] (計4件)

小松 真, 棒-管電極水中火花放電による噴流駆動の基本特性, 平成 21 年度電気学会全国大会, 2009 年 3 月 19 日, 北海道大学

小松 真, 水中放電駆動噴流と棒-管電極距離の関係, 平成 22 年度電気学会全国大会, 2010 年 3 月 18 日, 明治大学

小松 真, Dissection of Polyacrylamide gel with water jet driven by spark discharge, 第 49 回日本生体医工学会大会, 2010 年 6 月 25 日, 大阪国際交流センター

小松 真, 空中火花放電による水噴流生成時の管-棒電極の耐久性, 平成 22 年度電気学会全国大会, 2011 年 3 月 18 日, 大阪大学豊中キャンパス (東日本大震災により発表扱)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小松 真 (KOMATSU MAKOTO)
岩手医科大学・共通教育センター・講師
研究者番号:40347886

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし