接触圧-局所インピーダンス同時計測によるカテーテルアブレーションにおける機械特性モニタ

北里大学医療衛生学部医療工学科臨床工学専攻 相賀 すみれ

要旨

不整脈根治治療である高周波カテーテルアブレーション中のモニタリングとして、カテーテル先端と心筋組織間の接触圧 (contact force: CF) が広く用いられている。しかし心タンポナーデ等の重篤な副作用のリスクは CF 計測では完全には解決されておらず、心筋の硬さや厚み等の性状を評価する手段が求められる。我々は局所インピーダンス (local impedance: LI) 計測による心筋の推定ひずみと CF の同時計測により、心筋組織の機械的特性計測の可能性の検討を行った。

1. 背景と目的

致死性ではない不整脈の治療であるカテーテルアブレーション治療における、心タンポナーデ等の重篤な合併症の解決には、カテーテルアブレーション治療中の様々なモニタリングが必要と考えられる。現在のカテーテルアブレーション治療では、カテーテル先端と組織の接触圧力 (CF: contact force) を評価する CF モニタリングが広く普及しており[1]、また近年ではカテーテル先端付近の局所インピーダンス (LI: local impedance) を反映する LI モニタリングが新手法として用いられている^[2]。カテーテルアブレーション治療における焼灼効果には CF に加えて高周波出力、通電時間、安定性、組織抵抗などが関与すると言われている。そのうち LSI (lesion size index) は CF、高周波出力、通電時間の変数を用いて焼灼範囲を予測する指標であり^[3]、Ablation Index は CF、高周波出力、通電時間の変数をまとめて数値化し焼灼深度を予測する指標である^[4]。これらを指標としてアブレーションすることで安全かつ有効な焼灼が可能となり、重篤な合併症の防止に繋がっている。

しかし CF や LI は組織に対するカテーテルの接触状態およびカテーテル主体の情報のみを反映しているため、CF や LI そのものやそれを利用した焼灼状態の予測指標では心筋組織の厚みやかたさ等の組織側の機械特性を反映することは出来ていないのが現状である。心筋組織の機械特性は同じ心臓でも部位によって、また個体差や組織の変性によっても異なる。厚くかたい組織と薄く脆弱な組織に同じ出力でアブレーションした場合、脆弱な組織では穿孔のリスクが高まることは容易に考えられる。カテーテルアブレーション治療の合併症防止においてカテーテル主体の情報だけではなく、アブレーション治療中に標的である心筋組織側の情報を知ることは、より合併症防止に関わると考えられる。

そこで CF と LI の同時計測による心筋機械特性推定の新たなモニタリングを提案する。 同じ CF でも組織の厚みやかたさによってカテーテル先端の変位は異なる。同じ CF を与え

たとき、厚くかたい組織ではカテーテル先端が組織に埋まらない場合でも、薄く脆弱な組 織ではカテーテル先端が深く埋まったり、組織をカテーテルが突き抜ける場合もあると考 えられる。そして LI はカテーテル先端と組織の距離に相関があると言われており^[2]、カテ ーテル先端電極が組織に接触するよりも前から、カテーテル先端電極が組織に近づくにつ れ LI は上昇する。また組織にカテーテル先端を押し込んだ際も強く押し込むにつれ、電極 と組織間の接触状態によって LI は上昇する。このことから心筋にカテーテルを接触させた 際、および押し込んだ際の心筋の組織変形が計測可能であると考えられる。そこで CF と LI を同時計測することによって組織の機械特性が得られると考える。CF は組織にカテー テルを接触させた際のカテーテルが組織に与える応力に相当し、LI はカテーテル変位を反 映可能なことから組織変形によるひずみに相当すると考えられる。押し込みによって機械 特性を得るには対象が厚く変形が微小である必要があり、本研究における対象は心筋組織 であるため薄く変形は大きい。しかし心筋組織と類似性のあるゴム性膜への押し込みに関 して押し込み荷重と押し込みによる変形から、対象の機械特性を得られることが明らかに なっている^[5]。このため心筋組織においても組織に対する応力とひずみの同時計測可能と なれば、応力ひずみ曲線に相当する CF-LI 曲線から組織それぞれの機械特性を得られるの ではないかと考える。組織ごとの機械特性が推定可能となれば、心筋部位、焼灼ポイント ごとに心筋の特性や状態を考慮した適切なアブレーション条件の検討にも有用であると考 えられる。

本研究では心臓カテーテルアブレーション治療において過剰焼灼等による心タンポナーデ等の重篤な合併症防止を大目的に、接触圧力と局所インピーダンスの同時計測による組織の機械特性評価の検討を目的として、LI測定の範囲の調査実験と ex vivo ブタ心臓組織を用いた組織に対するカテーテル押し込み実験を行った。

2. 方法

図1に CF-LI 同時測定系の模式図を示す。LI 測定カテーテルをロードセルに固定することでデジタルペンレコーダにて CF を測定した。図2に LI 測定カテーテル先端の構成の模式図を、図3に LI 測定回路の模式図を示す。カテーテルのチップ電極-第3リング電極間に交流電流を印加し、チップ電極-第3リング電極間電圧、チップ電極-第1リング電極間電圧を測定し、LI を算出する。入力電圧とチップ電極-第3リング電極間電圧からチップ電極-第3リング電極間抵抗を求め、チップ電極-第3リング電極間電圧とチップ電極-第3リング電極間抵抗を求め、チップ電極-第3リング電極間電圧とチップ電極-第3リング電極間抵抗から電流を算出する。そしてチップ電極-第1リング電極間電圧を算出した電流で除して、チップ電極-第1リング電極間抵抗、すなわち LI を算出する。

カテーテル押し込み実験の前に行ったひずみに相当する LI の測定範囲調査ではブタ心臓の左心室組織に、異なる大きさの孔を開けた。孔の大きさは、カテーテルが心筋組織を押しつぶしてしまうことなく心筋組織に差し込めると考えられる幅のスリット、5

mm 角幅、10 mm 角幅の3種類とした。心筋組織の孔へカテーテルを刺しこんだ際、カテーテル径 2.7 mm を考慮した心筋組織-カテーテル距離(カテーテルに垂直方向)は5 mm 角幅のとき 1.15 mm、10 mm 角幅のとき 3.65 mm となった。カテーテル幅のスリットではカテーテルの周りに心筋組織が接触している状態、5 mm 角幅ではカテーテルと心筋組織が密に接触している状態ではないがカテーテルの周りのかなり近くに組織が存在している状態、10 mm 角幅ではカテーテルと心筋組織は接触していないがある程度近くに心筋組織が存在している状態を模擬できると考えたため、孔の大きさをこの3種類に決定した。孔を開けた心筋組織を37℃の0.3%NaCl 水溶液内に入れ、3種類の孔にカテーテル先端の4つの電極が完全に埋まりこんだ状態からカテーテルを引き抜きながらLIを測定した。カテーテルの引き抜きに対する変位は、水槽内にスケールを入れカテーテルとともに写真撮影することで測定した。

3. 結果および考察

図4に3種類の孔においてカテーテルを引き抜いた際のカテーテル位置とLIの関係 を示す。カテーテル先端の第3リング電極まで心筋組織に完全に埋没した状態をカテ ーテル変位 0 mm とした。カテーテル変位 11 mm あたりが第1リング電極まで心筋に 埋没している状態、そして 17 mm 付近がカテーテル先端の電極全て完全に心筋組織か ら出た状態である。孔の大きさが小さいつまりカテーテル垂直方向での心筋組織-カテ ーテル間距離が小さいほど LI は高く、反対に孔の大きさが大きいつまりカテーテル垂 直方向での心筋組織-カテーテル間距離が大きいほど LI は小さくなった。10 mm 角幅 の孔のとき、カテーテル変位に対して測定された LI は横ばいでほぼ変化は見られなか った。一方でカテーテル幅のスリットのときと 5 mm 角幅の孔のときでは、カテーテ ル変位に対して測定された LI はカテーテル変位 11 mm 付近まで横ばいであったが、 11 mm を超えると低下した。カテーテル径を考慮すると、10 mm 角幅の孔のときのカ テーテルに垂直方向の心筋組織-カテーテル間距離は 3.65 mm であるため、LI の変化は カテーテル垂直方向に 3.65 mm まで離れるとカテーテル変位をほとんど反映しないと 考えられる。また 5 mm 角幅の孔のときのカテーテルに垂直方向の心筋組織-カテーテ ル間距離は 1.15 mm である。カテーテル幅のスリットの方が 5 mm 角幅の孔よりも LI の変化は顕著であるが、5 mm 角幅の孔の場合でもカテーテルの変位に対して LI が変 化していることから、カテーテル垂直方向に 1.15 mm まではカテーテル変位を LI によ って反映可能であると言える。

カテーテル幅のスリットと 5 mm 角幅の孔において、カテーテル変位 11 mm を超えると LI は低下したが、この地点は心筋組織に完全に埋没していたカテーテルの第 1 リング電極が心筋組織から出た地点である。LI 測定が行われている電極は先端のチップ電極と第 1 リング電極であり、11 mm を超えた地点で LI 測定を行っている第 1 リング

電極が心筋組織から出たため LI が低下したと考えられる。また LI 測定のためにチップ電極と第 3 リング電極間に電流を印加しているが、それに用いられている第 3 リング電極が心筋組織から出ても LI は変化しなかったことから、LI はチップ電極-第 1 リング電極間でのみの変化を反映しておりカテーテル先端の電極全ての範囲ではなく、第 3 リング電極は LI 測定には介入していないと考えられる。またカテーテル幅のスリットでは、カテーテル変位が 11 mm を超えてからカテーテルの引き抜きに伴って LI が線形に低下している。このことから LI とカテーテル軸方向の変位は線形関係にありカテーテル変位を LI にて代用可能であることの確認が出来たと言える。

 $ex\ vivo\$ ブタ心臓組織におけるカテーテル押し込み実験では、ブタ心臓組織は左心室 (厚み: $14.2\pm0.7\ mm$) および右心房 $(1.9\pm0.2\ mm)$ の 2 部位を用いた。心筋組織を 37%の 0.3%NaCl 水溶液内に入れ、一つの部位について 3 か所の位置でカテーテルで の押し込みを行った。組織を固定するために凹型のシリコン土台を用いた。

図 5 にカテーテルを組織に押し込んだ際の CF と LI の変化を示す。横軸の Local impedance rise は測定された LI からカテーテルが組織と CF=0g で接触しているとき の LI を引いた値になっており、カテーテルの押し込みによって上昇した分の LI を表 している。また各部位のプロットは3か所の位置で行った押し込みの全てをプロット している。今回得たデータのフィッティングにはべき乗関数を用いた。組織にカテー テルを押し込むのと類似性があると考えられるゴム製の膜への押し込み実験にて、べ き乗関数でフィッティングを行っていたため、同様にべき乗関数でフィッティングを 行った^[5]。フィッティング関数において、y=CF、x=LI である。図5の CF-LI 曲線で は部位によって傾きが異なり、左心室の方が右心房よりも傾きが大きくなった。左心 室は右心房よりもかなり厚く、変形しづらいため、カテーテルの押し込みによる変形 に対して右心房よりも大きな力が必要になったと考えられる。つまり同じ LI rise であ ってもより高い CF が必要になったために傾きが大きくなったと考えられる。またこ のべき乗関数の指数は厚みに関連があると言われており^[6]、今回左心室の指数 1.26 よ りも右心房の指数 1.87 と大きくなった。このことからこの指数が大きいほど組織が薄 いと考えることができ、心筋の穿孔しやすさ、しにくさを表せるのではないかと考え られる。そして本実験における CF-LI の同時計測という本手法により、厚みの違う左 心室と右心房という2部位の機械特性の差を評価できていると考えられる。

4. 結論

本研究では接触圧力と局所インピーダンスの同時計測による組織の機械特性評価の検討を目的として、LI 測定の範囲の調査実験と ex vivo ブタ心臓組織を用いた組織に対するカテーテル押し込み実験を行った。CF-LI の同時計測により心筋組織の新たな機械特性推定モニタリングが可能になると考えられる。本研究により、カテーテルアブレーショ

ン治療において心筋部位、焼灼ポイントごとに心筋組織の特性や状態を考慮した組織 ごとの最適なアブレーション条件に関する情報を提供できる可能性が示唆された。

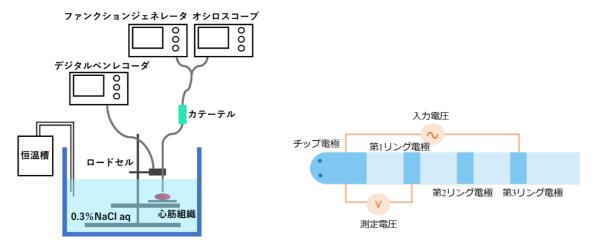


図1 CF-LI 同時測定系の模式図

図2 LI 測定カテーテル先端の構成模式図

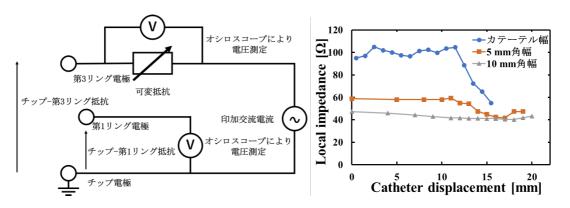


図 3 LI 測定回路模式図

図4 カテーテル引き抜きの際の カテーテル位置と LI の関係

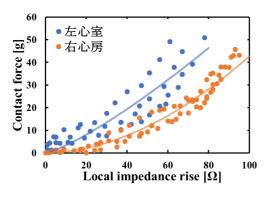


図 5 カテーテルの押し込みによる CF と LI の変化(y = CF, x = LI)

文献

- [1] 奥村謙 ほか, 高周波カテーテルアブレーション手技マニュアルー攻略法決定版, pp. 121-123, 株式会社 南江堂, 2015.
- [2] Matthew S. Sulskin et al, "Circulation: Arrythmia and Electrophysiology", vol.11, No.4, 2018
- [3] 山嵜継敬 ほか, LSI 指標アブレーションにおける CF および power の違いによる Lesion Size の検討, 第 54 回埼玉不整脈ペーシング協会, vol. 40, No.8, 2019
- [4] 岡田綾子 ほか, 最新のトピックス 心房細動アブレーション: 肺静脈隔離術, 信州大学医学部誌, 2019.
- [5] Junjie Lie et al, "Journal of the Mechanics and Physics of Solids", vol.112, pp.458-471, 2018.
- [6] 谷充 ほか, 球圧子の押込試験による軟材料の厚さと Young 率の計測, 日本機械学会論文集, vol.755, No.8, 2009.

指導教員

北里大学医療工学科臨床工学専攻医療電子工学研究室

小川 恵美悠