

論文タイトル

血液透析患者のシャント音を模擬した自己血管内シャントモデルの作製と評価

所属・著者名

桐蔭横浜大学医用工学部臨床工学科 新江義正、佐々木一真

要旨

研究室では、血液透析患者から得られたシャント音に対してウェーブレット変換による時間-周波数解析を実施することで、バスキュラーアクセス(VA)機能の経時変化の定量化を試みている。我々は、狭窄病変の狭窄率や狭窄長、吻合部から狭窄病変までの距離、VA 血管の性状(硬さなど)と、シャント音の性質を定量的に関連付けることを目的に、血液透析患者のシャント音を *in vitro* で再現できる自己血管内シャント(AVF)モデルの作製を試みた。動静脈吻合を模擬する Y 型チューブコネクタに狭窄病変を模擬した狭窄パーツを挿入し、その流出静脈側に血管を模擬したタフシロンゲル製チューブを接続して、そのチューブを血管周囲組織を模擬した食用蒟蒻内に留置した AVF モデルを作製した。各狭窄率の AVF モデルから得られた擬似シャント音の解析結果を、血液透析患者から得られた解析結果と比較したところ、良く一致した結果が得られたことから、血液透析患者のシャント音を *in vitro* で忠実に再現できる AVF モデルを実現することができた。

1. 目的

日本臨床工学技士会から「臨床工学技士のためのバスキュラーアクセス日常管理指針⁽¹⁾」が発行され、多くの臨床工学技士が血液浄化療法業務の中で VA 管理に携わっている。VA 管理に超音波診断装置等が導入されてきた現在でも多くの透析施設では、VA トラブルの早期発見を目的としたシャント音の聴診が実施されている。VA 機能低下の所見として見られる脱血不良の多くは狭窄病変が関与し、VA 管理のモニタリングとして聴診で得られたシャント音の変化から狭窄病変の有無やその進行度を推定する意義は大きい。研究室では、血液透析患者から得られたシャント音に対してウェーブレット変換による時間-周波数解析を実施することで、VA 機能の経時変化の定量化を試みている⁽²⁾。我々は、狭窄病変の狭窄率や狭窄長、吻合部から狭窄病変までの距離、VA 血管の性状(硬さなど)と、シャント音の性質を定量的に関連付けることを目的に、血液透析患者のシャント音を *in vitro* で忠実に再現できる自己血管内シャント(AVF)モデルの作製を試みた。

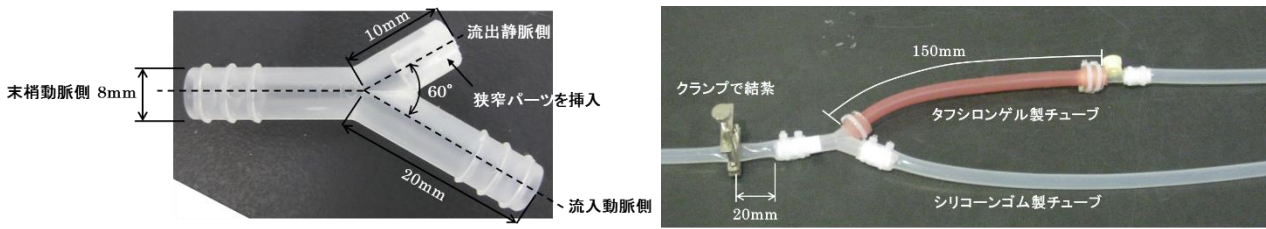
2. 方法

生体血管の引っ張り強さに近い値を有するタフシロンゲル製チューブ(TSG-A10、内径 6mm×外径 8mm、長さ 150mm、引っ張り強さ=3.1MPa、タナック株式会社)に、多機能型脈動ポンプ(ALPHA FLOW EC-1、フヨー株式会社)を用いて拍動数 60 回/分、心臓の収縮期と拡張期の割合を示す Duty 比を 35%に設定して、水を流した。チューブの中央に加速度型心音センサ(TA-701T、日本光電工業株式会社)を装着し、過去に産学医で共同開発した生体音分析装置(Bio Sound Analyzer:BSA)を用いて擬似シャント音の測定を試みた。タフシロンゲル製チューブは、拍動に応じてチューブが径方向に大きく膨張と収縮を繰り返す様子が目視で確認できるものの、血圧に相当する回路内圧を安定的に維持することが困難で、かつ擬似シャント音信号の振幅も非常に小さく、血液透析患者から得られるシャント音を再現するためには、動静脈吻合部と血管周囲組織を模擬しなければならないことがわかった。

そこでまず、動静脈吻合部を模擬するため、Fig.1(a)に示す Y 型チューブコネクタ(内径 6mm×外径 8mm、分岐角度 60°、ポリプロピレン製)の流出静脈側を分岐部から 10mm のところで切断した。VA 機能良好時の基準となる擬似シャント音を再現するため、Fig.1(b)に示すように Y 型チューブコネクタの流出静脈側にタフシロン

ゲル製のチューブを接続した。Y型チューブコネクタの流入動脈側、末梢動脈側及びタフシロンゲル製流出静脈端にはそれぞれシリコンゴム製のチューブ(ラボランシリコンチューブ、内径 6mm×外径 8mm、アズワン株式会社)を接続し、さらに末梢動脈側のコネクタ端から 20mm 離れた位置をクランプで閉塞することで、端(動)-端(静)吻合で吻合部下流の流出静脈に狭窄のない AVF モデル(狭窄率 0%)を作製した。次に、狭窄率を段階的に大きくした時の擬似シャント音の変化を調べるために、直径 6mm×長さ 10mm のアクリル製円筒の中央に、4.8mm(狭窄率 20%)、3.6mm(狭窄率 40%)、1.2mm(狭窄率 80%)の穴を貫通させた狭窄パーツを作製した。この狭窄パーツを Y 型チューブコネクタの流出静脈側の内部に挿入して接着剤で固定し、そこにタフシロンゲル製のチューブを接続することで、吻合部下流の流出静脈に狭窄病変が存在する 3 種類の AVF モデルを作製した。それぞれの AVF モデルの流出静脈で発生する擬似シャント音を測定するために、血管周囲組織を模擬した食用蒟蒻内にタフシロンゲル製の流出静脈を留置した。作製した AVF モデルに水を拍動流として循環させる拍動流循環システムを Fig.2 に示す。血液透析患者の血圧を模擬するために、Y 型チューブコネクタ上流におけるチューブ内の最高圧力が 120mmHg、最低圧力が 80mmHg になるように脈動ポンプの高出力と低出力を調整し、実験中は常に生体情報モニタ(Moneo BP-A308、フクダコーリン株式会社)で最高および最低圧力をモニタリングした。

Y 型チューブコネクタ端から 20mm 離れた食用蒟蒻表面に超音波ゲル(Aquasonic 100、Parker Laboratories, Inc.)を適量塗布した後、加速度型心音センサ(TA-710T、日本光電工業株式会社)をその位置に静置した。そして、その位置における擬似シャント音を BSA で 10 秒間測定した。各狭窄率のモデルに対して得られた擬似シャント音信号の解析には、生体音解析のために研究室で専用に開発したソフトウェア「WaveletDisp」を用いた。



(a) 動静脈吻合部を模擬した Y 型チューブコネクタ (b) 端(動)-端(静)吻合を模擬した AVF モデル
Fig.1 自己血管内シャント(AVF)モデル

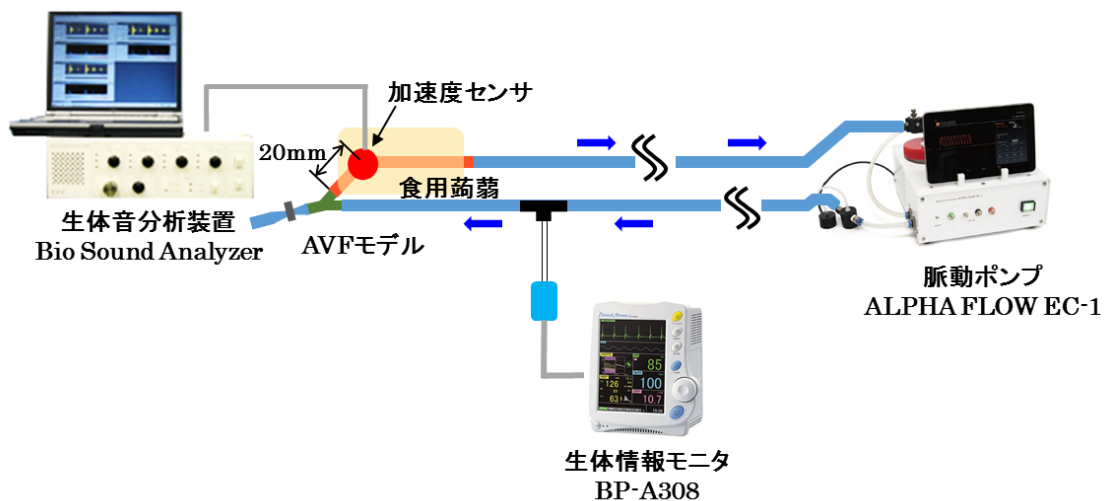


Fig.2 拍動流循環システム

3. 結果

①狭窄率 20%、②40%、③80%の AVF モデルから得られた擬似シャント音の解析結果を Fig.3 に示す。Fig.3 上段のグラフは、横軸を時間(0~3 秒)、縦軸を電圧として表したシャント音信号波形を示す。下段のグラフは、横軸を時間、縦軸を周波数(25~800Hz)として、そのシャント音信号波形をウェーブレット変換して得られた周波数成分の振幅スペクトルを青(小)~赤(大)のカラーマップ画像で示す。①狭窄率 20%では、約 25Hz~約 150Hz の低周波数成分で構成される連続的なローピッチと呼ばれるシャント音が得られている。しかし、②狭窄率 40%、③狭窄率 80%へと狭窄率が大きくなるのに伴って、①では見られなかった約 200Hz~約 800Hz までの中周波数成分から高周波数成分が徐々に増加し、シャント音が主に高周波数成分で構成される断続的なハイピッチへと移行する様子を AVF モデルで再現できた。

Fig.4 に過去に研究室で実施した血液透析患者の脱血側穿刺部で測定した PTA 実施後①43 日目、②71 日目のシャント音信号波形と、その解析結果を示す⁽²⁾。PTA 実施後の血管造影検査結果における血管径 a を基準にして、43 日目付近の血管径 b から狭窄率($\frac{a-b}{a} \times 100[\%]$)を計算すると 41.9%であった。同様に、71 日目付近の血管径 b から狭窄率を計算すると 80.5%であった。Fig.3 の②狭窄率 40%と③狭窄率 80%の解析結果と、Fig.4 の①狭窄率 41.9%と②狭窄率 80.5%の解析結果を比較すると、周波数成分の振幅スペクトルの分布が良く一致していることがわかった。この結果から、血液透析患者から得られるシャント音に対して研究室で検討している解析手法を適用し、シャント音の経時変化をモニタリングすることで、狭窄病変の進行度を定量的に評価することが可能であるとともに、概算ではあるが狭窄率も推定できる可能性が得られた。

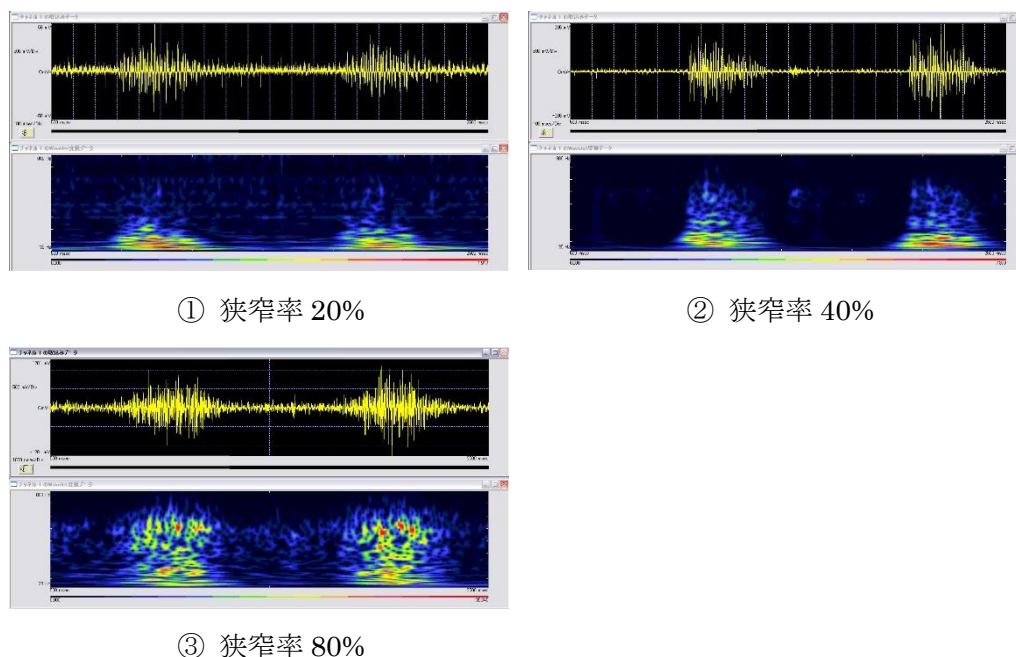
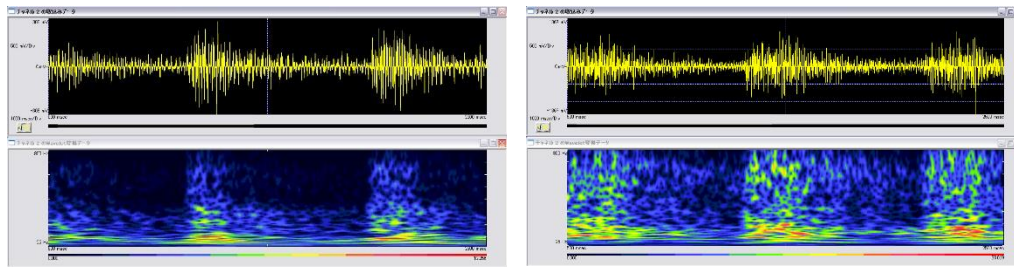


Fig.3 各狭窄率の AVF モデルから得られたシャント音信号波形とその解析結果



① PTA 後 43 日後 (狭窄率 41.9%) ② PTA 後 71 日目 (狭窄率 80.5%)

Fig.4 血液透析患者から得られたシャント音信号波形とその解析結果

4. 結論

動静脈吻合を模擬する Y 型チューブコネクタに狭窄病変を模擬した狭窄パーツを挿入し、その流出静脈側に血管を模擬したタフシロンゲル製チューブを接続した。さらに、そのチューブを血管周囲組織を模擬した食用蒟蒻内に留置した AVF モデルを作製した。各狭窄率の AVF モデルから得られた擬似シャント音の解析結果を、血液透析患者から得られた解析結果と比較したところ、良く一致した結果が得られたことから、血液透析患者のシャント音を忠実に *in vitro* で再現できる AVF モデルを実現することができた。

今後は、吻合部から狭窄病変までの距離や血管を模擬したタフシロンゲル製チューブの硬さ、あるいは AVF モデル内を循環させる溶液の粘度による影響についても検討していきたい。

文献

- 1) 公益社団法人日本臨床工学技士会 バスキュラーアクセス管理委員会, “臨床工学技士のためのバスキュラーアクセス日常管理指針”, 2015 年 7 月.
- 2) 佐藤敏夫, 村上彩子, 桂 尚樹, 本橋由香, 川島徳道, 澁谷有美, 泉 ゆかり, 高木絵美子, 本橋 尊, 星野敏久, 赤松 眞, 阿岸鉄三, 小見勝利, “シャント雑音のウェーブレット変換と正規相互相関分析法に基づいたバスキュラーアクセスの機能評価”, 医工学治療 2009;21(3):161-170.

指導教員の所属、名前

桐蔭横浜大学医用工学部臨床工学科

本橋由香、佐藤敏夫