

●特別講演

左室乳頭筋(群)構造と刺激伝導系

日本医科大学多摩永山病院内科・循環器内科 井川 修

1 乳頭筋(群)構造の考え方

左・右室乳頭筋は僧帽弁・三尖弁弁尖を支える房室弁構造の一部である。この房室弁とは4つの構成要素(①弁輪(annulus), ②弁尖(leaflet), ③腱索(chorda tendinae)および④乳頭筋(papillary muscle))からなる一つのシステムの名称である(図1右)。この房室弁構造、とりわけ、僧帽弁構造の概略は心エコー像のなかに確認可能である(図2a)。しかしながら、その像は実際のヒト心臓解剖所見(図2b)と比較してみると、必ずしも十分な構造を表現しているとはいえない。

図3a, bは、よく用いられる左室乳頭筋短軸・長軸(一部)断面を簡略化した模式図である。弁尖、乳頭筋および腱索構造の模式図として描かれる図である。確かに、これらはごくごく大ま

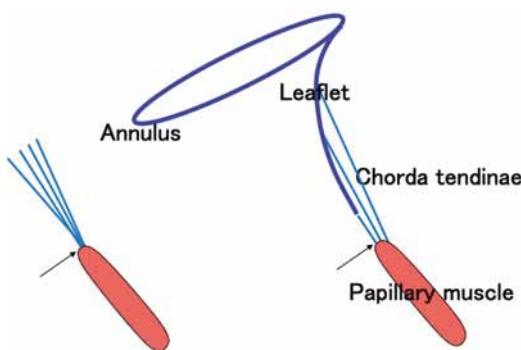


図1 房室弁構造

房室弁は、4つの構成要素(①弁輪(annulus), ②弁尖(leaflet), ③腱索(chorda tendinae)および④乳頭筋(papillary muscle))からなるシステムである。黒→に示す③-④連結部構造は右が正しく、左は誤りである。③-④連結点は1点ではなく多点である。

かな定性的構造理解のためには役立つかもしれないが、それを臨床の場で正確に利用するためには、この簡略図に重要な構造情報をさらに注ぎ込まなければならない。

2 乳頭筋(群)形状の特徴とbridging myocardium

左室短軸断面の模式図(図3a)に表現されている前外側・後内側乳頭筋(anterolateral/posteromedial papillary muscle : AL / PM PM)

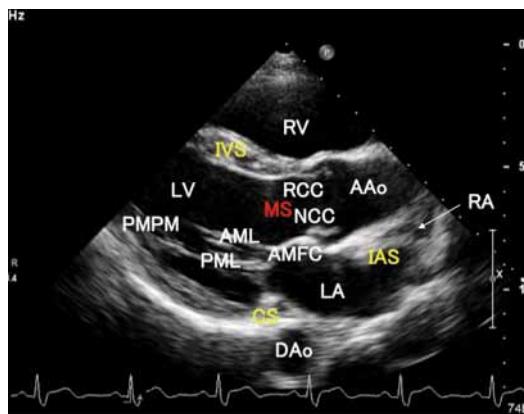


図2a 2D心エコー図にみる傍胸骨心臓長軸断面

右室(right ventricle : RV), 左室(left ventricle : LV), 心室中隔(interventricular septum : IVS), 上/下行大動脈(ascending/descending aorta : A/DAo), 心房中隔(interatrial septum : IAS), 左/右房(left/right atrium : L/RA), 冠状静脈洞(coronary sinus : CS), 大動脈弁無冠尖(non-coronary cusp : NCC), 大動脈弁右冠尖(right coronary cusp : RCC), 僧帽弁前/後尖(anterior/posterior mitral leaflet : A/PML), aorto-mitral fibrous continuity(AMFC)

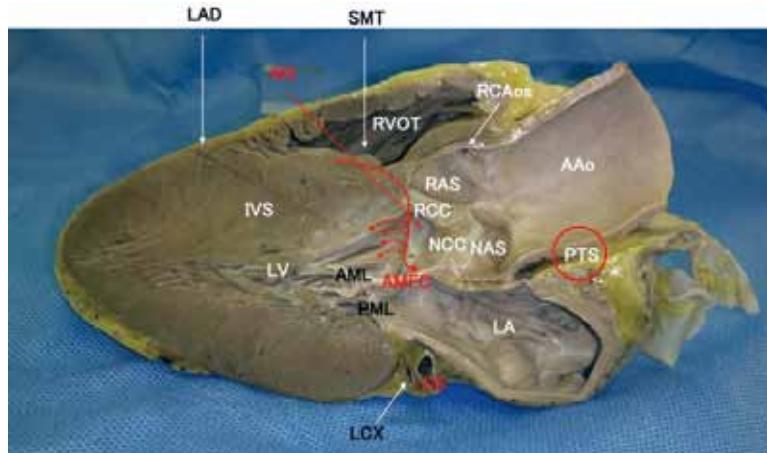


図2b 剖検心にみる心臓長軸断面

2D心エコー（傍胸骨左室長軸断面）に対応する断面である。大動脈無冠尖(NCC)から僧帽弁前尖(anterior mitral leaflet: AML)への移行部は、aorto-mitral fibrous continuity (AMFC)とよばれる心筋組織を含まない線維組織で構成されている。大動脈弁右冠尖(RCC)と無冠尖(NCC)の交連直下には線維性構造物の膜性中隔(membranous septum: MS)が位置する。心膜横洞(pericardial transverse sinus: PTS)，中隔縁柱(septomarginal trabecula: SMT)，左冠動脈前下行枝(left anterior descending coronary artery: LAD)，左冠動脈回旋枝(left circumflex coronary artery: LCX)

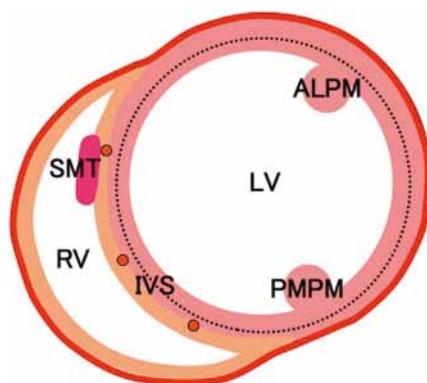


図3a 心室短軸断面

注目すべきは、①右室は三日月型、②心室間中隔(interventricular septum: IVS)は右室心筋と左室心筋よりなる合板構造となっている。ちなみに左室自由壁は3層(内斜走心筋、中輪状心筋、外斜走心筋)、右室自由壁は2層の心筋で構成されている。右室側心室中隔には中隔縁柱(SMT)とよばれる筋肉束がみられるが、この筋肉束に沿って絶縁された右脚が走行している。赤丸は冠動脈心室中隔枝である。

はそれぞれ1本であるが、それらは決して1本の筋束ではない。乳頭筋は必ず、群を成し筋群として存在している(図4a～c)。つまり、前外

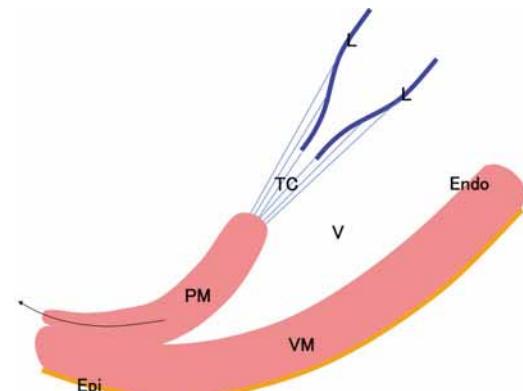


図3b 乳頭筋群長軸断面を含む左室長軸断面構造の一部

乳頭筋群は斜めに左室壁に接続しているがこの筋束はこの部位では終わらず、矢印方向(←)の心尖部まで伸びていく。

側乳頭筋ではなく前外側乳頭筋群、後内側乳頭筋ではなく後内側乳頭筋群なのである。また、両筋群とも必ず左室自由壁より起始している。ときに、テキストによっては後内側乳頭筋群が心室中隔に位置するように描かれている図を見かけるが、これは誤りである。両左室乳頭筋群

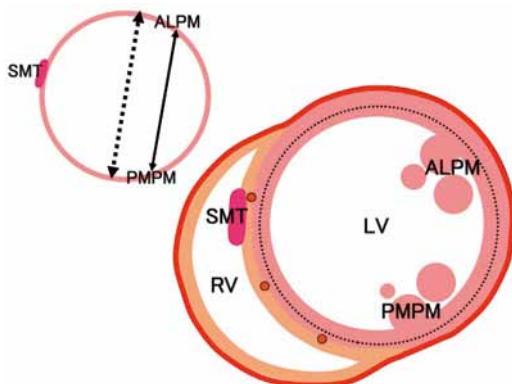


図4a 傍胸骨心室短軸断面の模式図

乳頭筋は1本ではなく乳頭筋群として存在する(左室前外側・後内側乳頭筋群)。両乳頭筋群の正確な位置とそれらを結ぶ線と中心線との位置関係を左上に示す。

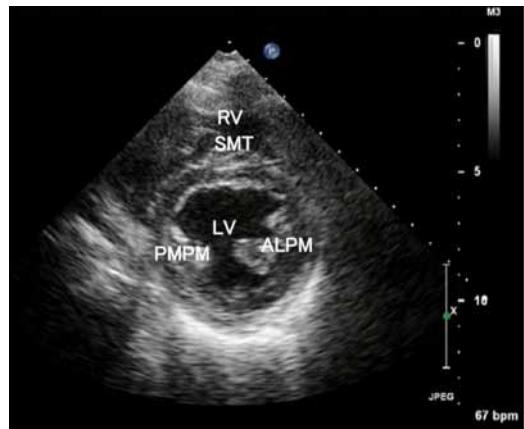


図4b 2D心エコー図にみる傍胸骨心室短軸断面

乳頭筋は1本ではなく乳頭筋群として存在する。1本であったとしてもその筋肉束は枝分かれしその枝分かれした筋肉束に腱索が連結している。

は決して心室中隔には位置していない。

図4a左上模式図のとおり、その起始点と起始点とを結ぶ線(実線↑)は円形を呈する左室内腔の直径(点線↑)を示す線とはなっていない。その線は図のような前側壁と後側壁を結ぶ線であり、後側壁に位置しているといえる。この起始点については重要な特徴があり後述する。

また、左室長軸乳頭筋(群)部長軸断面(図3b)をみると乳頭筋(群)は左室自由壁より斜めに起始するように描かれているが、これも詳しくいえば正しい構造とはいがたい。前外側・後内側乳頭筋群とも斜めに左室壁付着点に付着するが、そこでそれらの筋束構造は終了しているのではなく付着後、両筋束はそのまま心尖部まで伸びていく。そして心尖部近傍で両筋束は連絡する。この構造を別ないい方をすれば、両乳頭筋(群)は心尖部にある筋束(bridging myocardium)を介して連結されているのである(図5、図9a, b)。

3 乳頭筋(群)と腱索・弁尖の関係(1交連・1乳頭筋群の関係)

乳頭筋(群)は腱索を介して弁尖を支持する。この部位の構造もきわめて重要であるが、おおざっぱな認識しかなされていない。その支持様

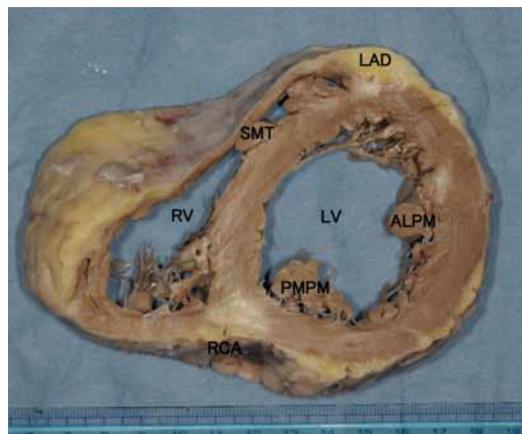


図4c 剖検心にみる心室短軸断面

式は、前外側乳頭筋群が僧帽弁前尖および後尖の前半部へ、後内側乳頭筋群が僧帽弁前尖および後尖の後半部へ腱索を伸ばすことにより両弁尖を支持している(図6)。この関係を構造から考えてみると、前尖と後尖の前半部を均等に下方より支持する部位と言えば前交連の下方、同様にそれらの後半部を下方より支持する部位は後交連の下方ということになる。構造的に、両乳頭筋群は両交連と関連し、それぞれ支持を担当する領域が決まっている。筆者はこの心室内

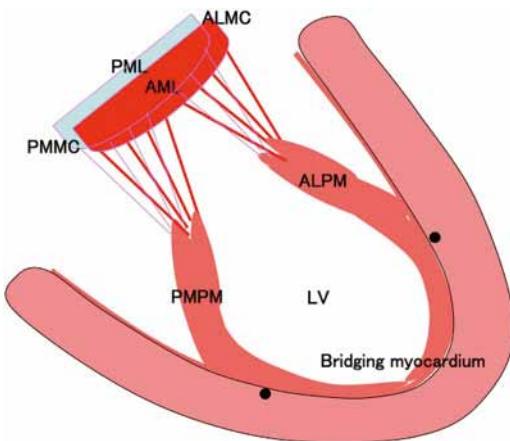


図5 左室前外側・後内側乳頭筋群の心尖部方向への伸展の様相とそれら結ぶ「橋渡し心筋(bridging myocardium)」

左室前外側・後内側乳頭筋群は、斜めに左室付着点に付着後、それぞれ心尖部方向に伸び、bridging myocardiumにより結ばれる。●は電気的興奮が、左脚前枝・後枝からPurkinje線維へbreakthroughする部位である。

房室弁支持構造の特徴を『1交連・1乳頭筋群の関係』と表現し、その構造的認識方法として提唱している(図6a)。

注意すべきことは、左室短軸断面で僧帽弁前外側・後内側交連の関係を観察すると、図6bで示すようにそれらを結ぶ線は前側方に位置するのに対し、両乳頭筋群起始点を結ぶ線は後側方に位置することである。2D心エコーでは、この両乳頭筋群と両交連の関係を同時に短軸像の上に描出できない。したがって、この位置関係のイメージを情報として知っておく必要がある。

上記のとおり、二つの弁尖の前・後半分のみに腱索を伸ばすこの両乳頭筋群構造、とりわけ乳頭筋・腱索接合部構造のイメージを図1左のように表現して記述されている場合がある。構造的に考えて、これは明らかにありえない構造でさらに詳細な理解が必要である。多くの腱索は、決して乳頭筋の1点から起始してはいない。それぞれの腱索を担当する乳頭筋の筋肉束が存在するものと考えるべきである。万一、図1左のような構造をとった場合、負荷は1点に集中

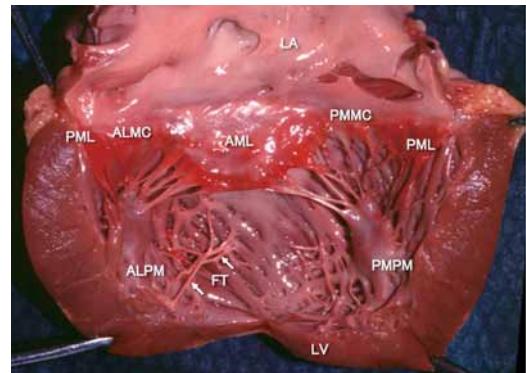


図6a 『1交連・1乳頭筋群の関係』について
前外側・後内側交連(anterolateral/posteromedial mitral commissure : AL/PMMC)との関連はそれぞれの下方に前外側・後内側乳頭筋が位置している。

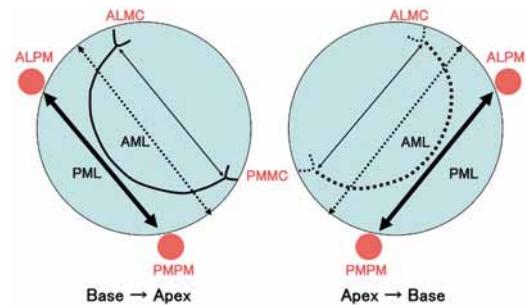


図6b 左室内腔における前外側/後内側乳頭筋群を結ぶ線(太い線)と前外側/後内側交連を結ぶ線(細い線)の関係(左が左室内腔を心基部から心尖部へ、右が心尖部から心基部へ見た図)

両線は中心線(点線矢印)を境に対側に位置する関係である。

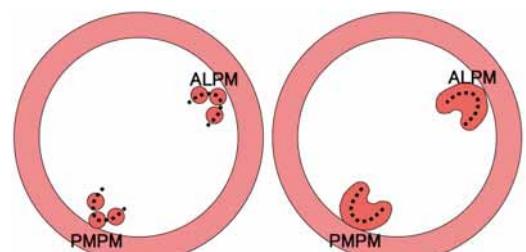


図7 左室乳頭筋群の構造(分枝状・棍棒状)イメージ

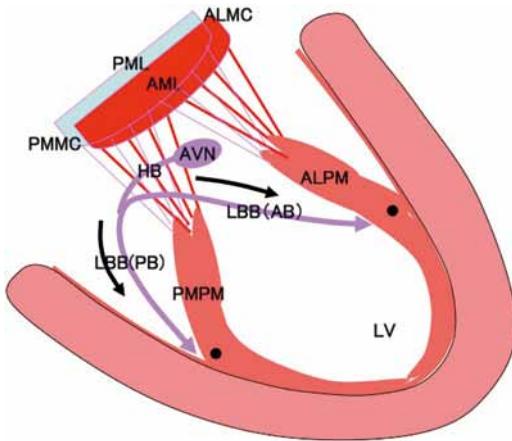


図8a 左室乳頭筋群と刺激伝導系

電気的興奮は絶縁された状態で左脚前枝・後枝を下行し breakthrough point (●)で Purkinje 線維に breakthrough する。右上は、乳頭筋群間を結ぶ線と僧帽弁前外側交連と後交連を結ぶ線の位置関係を示したもの。

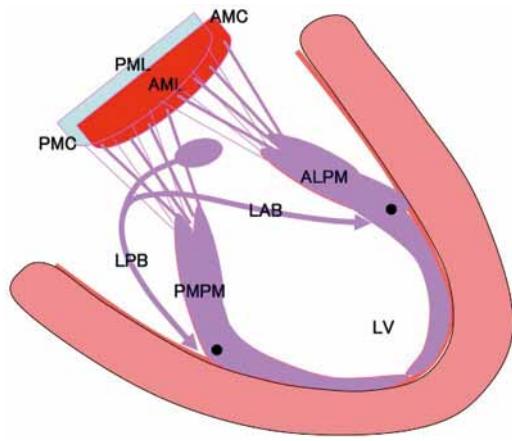


図8b 左室乳頭筋群と刺激伝導系

Purkinje 線維へ breakthrough した電気的興奮は周囲固有心筋の興奮・収縮に先駆けて、乳頭筋群を興奮・収縮させ腱索を緊張、弁尖を支える。

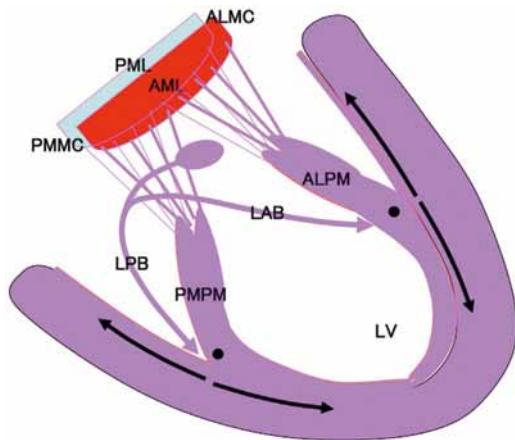


図8c 左室乳頭筋群と刺激伝導系

電気的興奮は周囲の左室固有心筋にも breakthrough し、心尖部から心基部へ伝播することにより、左室全体は興奮・収縮する。これにより「構造的房室弁逆流防止機構」が働く。

するためきわめて力のバランスの悪い構造となる。しかしながら、模式図1右で表現される腱索の乳頭筋からの起始点がそれぞれ担当する腱索ごとに離れている真の構造では、負荷は分散し1点に大きな力が集中することはない。合目的に考えれば、当然のことである。乳頭筋の形状にはきわめて個人差が存在するものの、その構造の基本は弁尖半側をスムーズに支えることのできる形状(馬蹄形)となっている(図7)。

4 構造的房室弁逆流防止機構

電気的に絶縁された左室内刺激伝導系(左脚前枝・後枝)を下行してきた正常電気的興奮(図8a)は、それぞれ前外側・後内側乳頭筋群左室起始部で Purkinje 線維に breakthrough し、乳頭筋群を興奮・収縮させる(図8b)。その後、その興奮は周囲左室固有心筋にも breakthrough し、心尖部から心基部へ伝播することにより左室全体を興奮・収縮させる(図8c)。

つまり、左室乳頭筋群がすべてに先駆けて興奮収縮する。その後、周囲の固有心筋が心尖部から心基部に向けて興奮収縮する。この生理的な「興奮収縮連関」により、左室内刺激伝導系(左

脚前枝・後枝)より前外側・後内側乳頭筋群への興奮の到達と breakthrough → 左室外側・後内側乳頭筋興奮・収縮 → 僧帽弁腱索緊張・弁尖支持 → 左室固有心筋興奮・収縮 → 完全な僧帽弁閉鎖での左室駆出状態が完成する。

刺激伝導系よりの「正常な興奮伝播」が、正常な「興奮・収縮」の連関を作り出している状態で

ある。ここで「正常な興奮伝播」とは、心室最早期興奮部位が乳頭筋群となるような興奮伝播様式、つまり、心室内興奮伝導遅延のない状態である。これは心電図上ではNarrow QRSを呈する状態と理解される。筆者はこの生理的に備

わった房室弁逆流防止機構を「構造的房室弁逆流防止機構」とよぶことを提唱している。

もしも、この生理的な「構造的房室弁逆流防止機構」が働かず、刺激伝導系よりの正常な興奮伝播がすべての左室筋に先駆けて乳頭筋群に入らなければ、この生理的な連関は維持されず「固有心筋興奮・収縮→乳頭筋群興奮・収縮」となる。この場合、僧帽弁腱索の緊張がなく弁尖が支持されていない状況下に左室固有心筋興奮・収縮が開始され、房室弁逆流が生じることとなる。脚ブロック、とりわけ左脚ブロック、心室ペーシング状態がそれにあたる。これらの状況では、上記の生理的な「構造的房室弁逆流防止機構」は破壊され、大なり小なり僧帽弁閉鎖不全による僧帽弁逆流が生じることより左室、左房負荷が増大する。ときに、これらの病態では長期的にみて心不全となることも経験される。長期に施行された右室ペーシングでときには心不全(ペースメーカ症候群)の1要因として「構造的房室弁逆流防止機構」の破綻も考慮されるところである。

以上より、乳頭筋群は興奮収縮連関の重要な基点となっていると考えることができる。

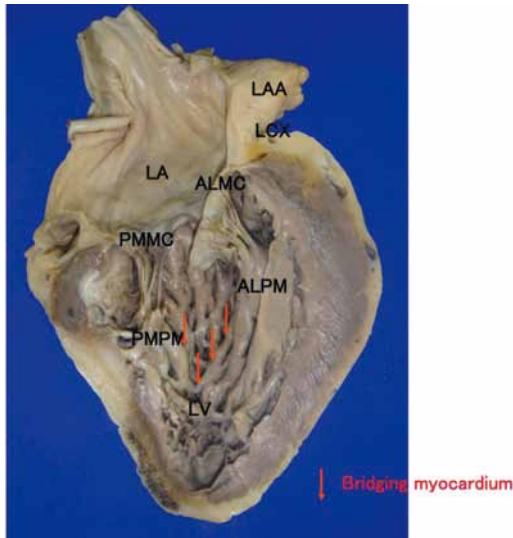


図9a 剖検心に見る心尖部2腔断面

前外側乳頭筋と後内側乳頭筋を連結する橋渡し筋束(bridging myocardium)が観察される。

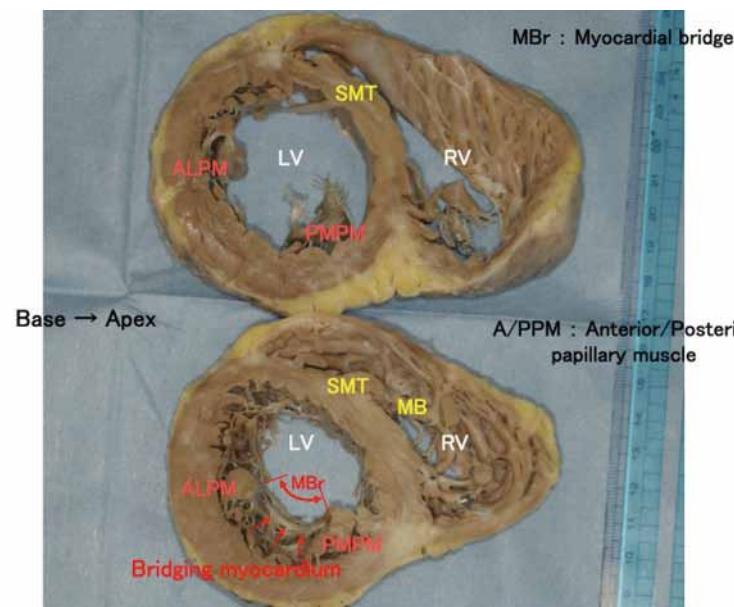


図9b 剖検心において心室短軸断面を上方からみたものの(上:心基部, 下:心尖部)

両者に前外側/後内側乳頭筋が観察できるが、心尖部領域(下)では両筋束が、bridging myocardium(赤↑)により連結されていることがわかる。

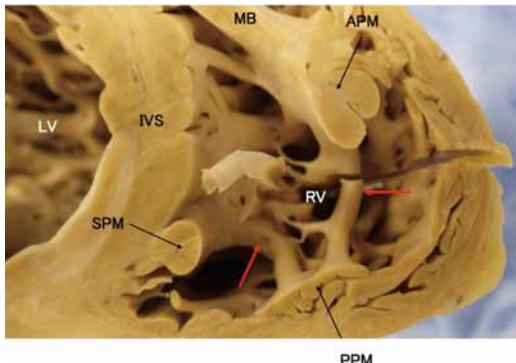


図10 心室内腔を上方より見たもの

右室では前・後および中隔乳頭筋(anterior/posterior septal papillary muscle of RV : A/P/SPM)を橋渡しする橋渡し心筋(bridging myocardium)(赤→)を確認できる。

5 前外側・後内側乳頭筋群間の電気的・構造的なLinking

筆者は、前外側・後内側乳頭筋群間を構造的に連絡し、電気的にも構造的にも周囲心筋と完全に絶縁されている筋肉束(連結筋束)の存在を確認している(日本循環器学会で発表済み・ジャーナルへは未発表)(図9a, b)。さらには、構造的に線維組織に取り囲まれ電気的に隔離されているこの筋肉束を形成する心筋細胞は、その形態的特徴より Purkinje 線維と考えられる。このことから、前外側・後内側乳頭筋群は電気的にも速い伝導特性を有する隔離された Purkinje 線維により連結されている可能性が存在する。「前外側・後内側乳頭筋群間の電気的・構造的なLinking」の可能性を示唆する所見である。ここでは、左室乳頭筋群を中心にその構造を紹介したが、右室でも右室乳頭筋(群)間を橋渡しする「右側橋渡し筋(bridging myocardium)」と考えられる構造を確認することができる(図10)。同様の電気的・構造的なLinkingは右室でも乳頭筋(群)と三尖弁弁尖との間にも存在すると考えられる。

6 右室刺激伝導系と左室刺激伝導系の興味深い位置関係

上記、左脚前枝が向かう前外側乳頭筋および

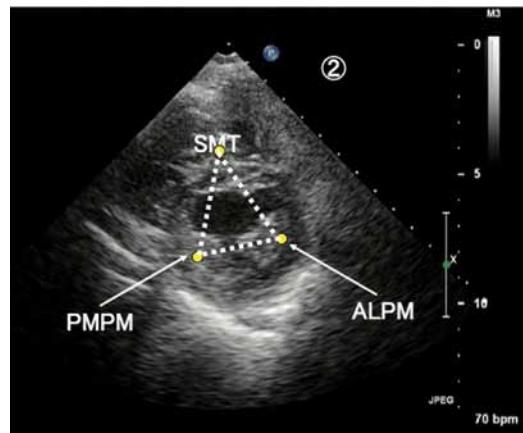


図11 2D心エコーに見る心室短軸断面

前外側乳頭筋および後内側乳頭筋と中隔縁柱とは中隔縁柱を頂点とする二等辺三角形の位置関係にある。

後枝が向かう後内側乳頭筋と、右室で右室前乳頭筋へ向う右脚が沿っている中隔縁柱とは図11に示すとおり、中隔縁柱を頂点とする二等辺三角形の位置関係となっている。この特殊な位置関係は、生理的な心機能を保つうえでなんらかの意味をもつと考えられるが、現段階では不明といわざるをえない。

7 さらなる検討を目指して

心室乳頭筋(群)は不整脈起源となることがありそれに対し積極的にカテーテルアブレーションも施行されている。しかしながら、その構造についての詳細な情報も少なく、積極的な議論もない。刺激伝導系の一部を成すこの構造に対してのさらなる検討が望まれるところである。

(埼玉不整脈ペーシング研究会での講演内容の一部をまとめた)

文 献

- 1) 井川修. 臨床心臓構造学: 医学書院; 2011年3月.
- 2) Keith L. Moore, Arthur F. Dalley II. Clinically oriented anatomy (Fifth Edition). 臨床のための解剖学. (監訳)佐藤達夫, 坂井建雄. メディカル・サイエンス・インターナショナル: 2008年4月.