５．馬にみられる病気　⑱

競走馬の循環器系（心臓・血管）とその疾患　その１

軽種馬育成調教センター　調査役　吉原　豊彦

今号では競走馬が速く走るためには欠くことのできない心臓および血管からなる循環器系の構造と機能を中心に解説しましたので参考になれば幸いです。

心臓の構造

心臓の筋肉は骨格筋と同じ横紋筋から成り、一般に横紋筋は随意筋（自分の意志で動かすことができる筋）ですが、心筋は例外的に不随意筋です。通常、骨格筋細胞は核が複数から成っているのに対し、心筋細胞には核が一つしかないという特徴があります。

動物の心臓は、進化の過程で変化してきました。馬や人をはじめ哺乳類の心臓は全身に送られた血液が再び心臓に戻るときに入る心房と、血液を送り出す心室の 2 つの部分から構成されており、2 心房 2 心室で出来ています。ところが魚類の心臓は 1 心房 1 心室からなり、全身から戻ってきた血液は心房に入り、次いで心室から送り出された血液は、鰓（えら）でガス交換され、酸素を豊富に取り込んだ後、そのまま全身に送られます。両生類や爬虫類は、2 心房 1 心室で構成された心臓を持っています。ただし、爬虫類の中でもワニの心臓は 2 心房と 2 心室から成っています。鳥類および哺乳類の心臓は 2 心房と 2 心室の計 4 部屋に完全に区分されています。両生類や爬虫類（ワニを除く）の 2 心房 1 心室の心臓では、肺でのガス交換により酸素を多く含んでいる血液が左心房に入り、全身から帰ってくる血液は右心房に入ります。これらの血液は 1 つしかない心室に入るわけですが、それぞれの血液はあまり交じり合うことなく、肺から戻り酸素を多く含んだ血液は全身へ、一方、全身から戻ってきた酸素をあまり含まない血液は肺へというように都合よく送られるようになっています。

鳥類や哺乳類の２心房２心室の心臓になると、全身から右心房に戻ってきた血液は、右心室から肺に送られ、肺でガス交換された血液が左心房に戻り、左心室から全身へ送られます(**図１**)。このように左右に完全に分離した２心房２心室の心臓では、非常に効率よく血液を送り出すことができます。

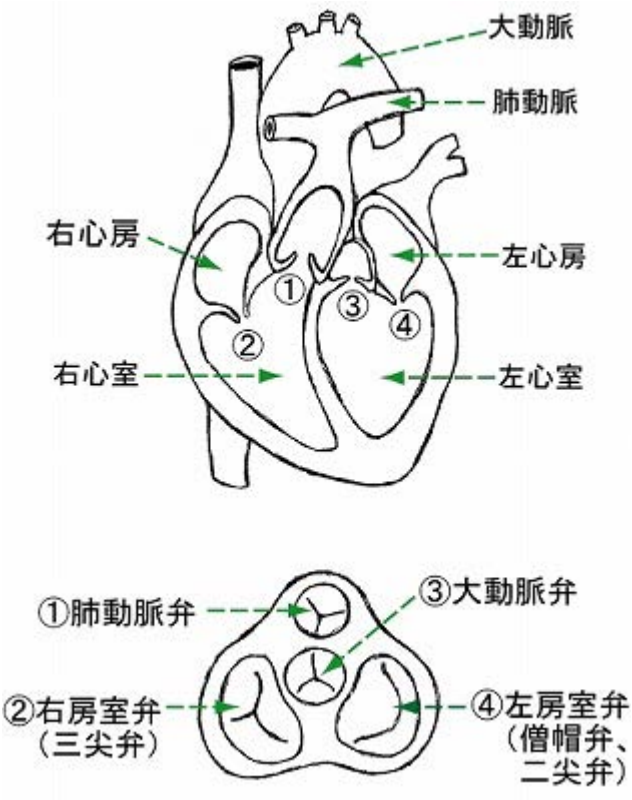

図１　哺乳動物の心臓の模式図

心臓と血液の循環経路

心臓は血液を送り出すポンプの役割を果たしており、血管は全身にくまなく豊富な酸素を含んだ血液を送り込むとともに役目を果たした血液を元の心臓に戻す働きをしています。心臓から血液を送り出すときに通る血管が動脈であり、動脈は心臓から離れれば次第に細くなり、最後は毛細血管になります。毛細血管では酸素や二酸化炭素および各種栄養素などの受け渡しが行なわれます。毛細血管を出た血液は静脈に集まってくるため、静脈はだんだん太くなりやがて心臓の右心房に戻ってきます。すなわち、血液は心臓を中心として、動脈血は左心室から大動脈を経て全身(骨格筋)に送られ、末梢の毛細血管に至り、そこから静脈系でだんだん太い静脈となり、最後は大静脈となり、右心房から右心室に入り、肺動脈を介して肺に送られガス交換で豊富な酸素を取り込んで肺静脈から左心房さらに左心室という経路で再び全身を循環します（**図２**）。

また、全身に送られる血液の流れを一方向に維持し血液の逆流を防ぐため、心臓内の４つに区画された部屋（左右の心房および心室）にはそれぞれ弁が付いています。右心房と右心室の間には右房室弁（三尖弁)、右心室と肺動脈の間の弁は肺動脈弁です。また、左心房と左心室の間にあるのが左房室弁（僧帽弁・二尖弁)、左心室と全身をめぐる大動脈の間にあるのが大動脈弁です。

肺でのガス交換により豊富な酸素を含んだ血液は動脈血と呼ばれますが、ここで誤解していけないことは、解剖学的には静脈に分類される肺静脈という名称の血管を流れていますが、血液の中身は動脈血であるということです。逆に肺動脈の中には静脈血が流れています。

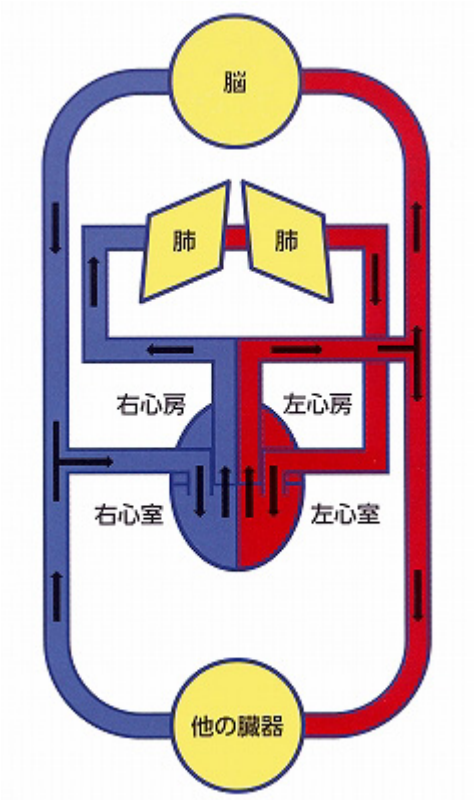

図２　哺乳類の心臓と血液循環の経路（模式図）
左心室から出た新鮮な血液は、次のような順に循環して再び左心室に戻ってきます。左心室⇒大動脈⇒全身(骨格筋など)⇒大静脈⇒右心房⇒右心室⇒肺動脈⇒肺⇒肺静脈⇒左心房⇒左心室

刺激伝導系

心臓には刺激伝導系と呼ばれる刺激を各所の心筋に伝える仕組みが備わっています。心筋細胞は刺激に応じて興奮して収縮します。右心房に位置する洞（房）結節と呼ばれる部位は一定の頻度で自動的に興奮し、その電気的興奮は周囲の心房筋に伝わり、心房筋全体を興奮させるとともに、心房内を伝わって、房室結節に至ります。興奮は次いでヒス束を通過し、右脚・左脚を経由して、心室筋に分布するプルキンエ線維に達します(**図３**)。つまり、心臓を収縮させる刺激は、洞（房）結節から房室結節を経て、最終的には心室筋全体に行き渡ります。

心臓の刺激伝導系に関する研究は、日本人の研究者である田原 淳博士が大きく貢献しています。1900 年代初頭ドイツのマールブルグ大学に留学した田原博士は、病理学教室のアショッフ教授の指導で哺乳動物の心臓組織の研究を進め、心臓の刺激伝導系の存在を明らかにし、刺激伝達系に重要な役割を果たしている房室結節を発見しました（1906 年)。房室結節は別名で「アショッフ・田原結節」あるいは単に「田原結節」の名でも呼ばれています。田原博士は心臓の房室結節さらにはプルキンエ線維の役割をも含めて刺激伝導系全体を解明した研究者であり、研究者間で論争となっていた心臓拍動の神経原説と筋原説の対立は筋原説の勝利という形で終止符を打ち、心臓の収縮メカニズムの解明に大きく貢献したこの業績は、わが国が世界に誇り得るまさにノーベル賞に値する研究であったといえます。

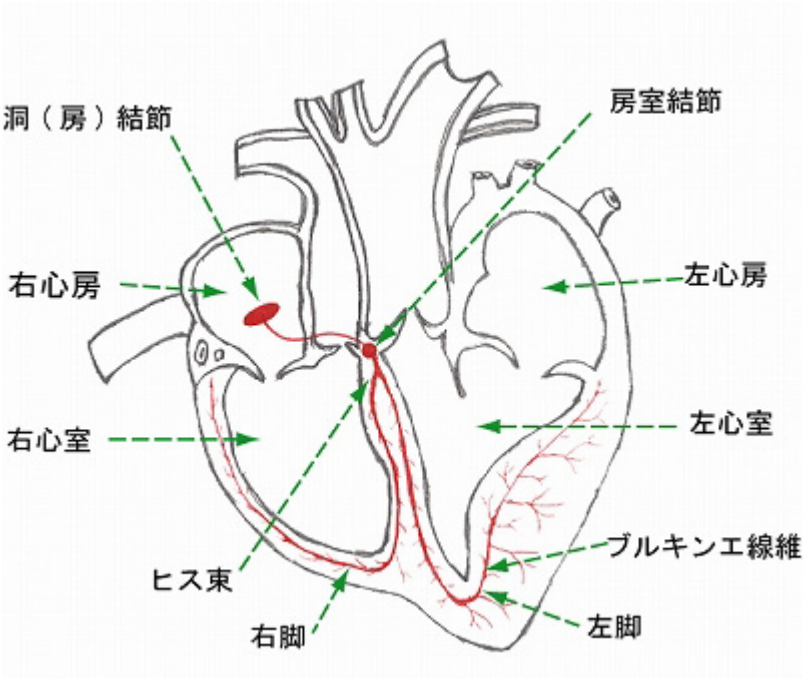

図３　心臓の刺激伝系（模式図）
心臓を収縮させる刺激は、洞（房）結節から房室結節を経て最終的に心室筋全体に行き渡ります

サラブレッドの心臓の大きさ

一般に、体の大きい動物ほど大きな心臓を持っており、体重が数グラムのネズミと何トンもある象では当然心臓の大きさが違います。動物の体重と心臓重量との間にどのような関係があるのか調べた研究成績によると、動物の心臓重量と体重の間には、心臓重量＝0.0059×体重×0.98 という関係があったということです。この式で×0.98 はほぼ１に等しいことから、哺乳類の心臓重量は体重の約 0.6%であることを表しています。この式によると、体重 500kg のサラブレッドの心臓重量は約 3kg になりますが、実際、体重 500kg のサラブレッドの心臓の重さは最低でも 5kg、すなわち体重の 1%あるのは普通です。すなわちサラブレッドの心臓は、平均的な動物に比較してとび抜けて大きいことが分かります。ちなみに、心臓重量は人では約 250ｇ（体重の 0.4%）、重種馬（ペルシュロン）は約 4,700ｇ（体重の 0.6%）、競走馬（サラブレッド）は 4,000～5,000ｇ（体重の約 1%）で、さらにトレーニングを積んだ競走馬は心臓重量比が 1.1%にもなります（**表１**）。以前、JRA 競走馬総合研究所（総研）で一流競走馬の生理機能を調べたことがあります。心エコー検査で得られた測定値から心臓重量を推測すると、一流競走馬の心臓重量は約７kg 近くあり、その馬体重の 1.5%を超えるような大きな心臓であったと考えられます。

表１　動物の体重と心臓重量

種類	体重(kg)	心臓重量(g)	体重に対する心臓重量比
人	60	250	0.42
軽種馬	490	4,700	0.97
重種馬	770	4,700	0.61
犬	25	300	1.29
豚	102	300	0.30
牛	550	1,900	0.35
象	6,650	2,600	0.39

競走馬の心拍数と酸素運搬能力

一般に、健康な普通の人の平常時の心拍数は 60～70 拍／分ですが、一流長距離選手では約 40 拍／分です。これが競技中には酸素の必要量が増えて百数十拍／分に増加します。心臓の拍動は休むことなく、人で１分間の心拍数を 70 拍／分と仮定すると、１日に 10 万回余り繰り返すことになります。競走馬の場合、平常時の心拍数は 30～40 拍／分程度ですが、一流競走馬には二十数拍／分の馬がいます。これがレース中には、220～240 拍／分ほどに増加します。すなわち競走馬では安静時の約７倍前後にも増え、人のそれと比べるとはるかに高性能といえます。

血液には粘性があるため、ある限度以上に心拍数が増えると血流の抵抗が大きくなり酸素の運搬が効率的ではありません。各種動物の体重１kg 当たりの血液量をみてみると、競走馬は他の動物に比べてはるかに多い血液量といえます（**表２**）。さらに、運動によって消費される酸素は、赤血球に含まれるヘモグロビンによって運搬されるため、血液中のヘモグロビン量が多いことが必要になります。赤血球数は安静時に人では約 450 万個／㎣ありますが、競走馬では 945 万個／㎣と人の２倍以上もあります。さらに、競走馬は普段から脾臓に大量の血液を貯蔵しており、運動すると赤血

球を大量に含んだ血液が循環血液に流れ込んで赤血球の濃度は安静時の 1.5 倍以上になります。皆さんがマラソンで急に速く走ろうとしたときに、脇腹が痛くなった経験があると思います。これは急に激しい運動をすることにより、全身に酸素を供給するため、脾臓にプールされていた血液が大量に放出された結果、脾臓が急激に収縮することによって起こる痛みと考えられます。

表２　体重当たりの血液量

種類	血液量(ml／kg)
人	64～97
軽種馬	103～110
犬	82～103
ウサギ	57～70
ネズミ	50～85
豚	35～46
牛	58

サラブレッドの血液の特徴

馬が走るためには骨格筋を使いますが、それを構成している筋細胞はエネルギーを生み出さなければなりません。この時に重要な働きをするのが酸素であり、馬は酸素を使いエネルギーを産生し、二酸化炭素を排出します。この酸素を取り入れ、体内で消費して二酸化炭素を放出する働きを呼吸といいます。肺で酸素を取り入れた血液は全身に送り出されますが、血液を循環させるポンプの役割を果たしているのが心臓です。動物が生きていく上で欠くことのできないこれらの営みを支えているのが心臓と肺であり、大変重要な機能を果たしています。それでは、血液循環の役割を果たしている心臓や血管について説明する前にそれらの中を流れる血液について少し触れておきます。

馬や人を含め動物の体内を循環している液体（体液）には血液とリンパ液があります。血液の溶解成分は体内の細胞や組織に直接混ざり合うことはなく、最初に組織液と混ざり、次に細胞に入ります。リンパ液というのはリンパ管に流れ込んだ組織液のことです。血液は血管をリンパ液はリンパ管を通路としており、血液は駆動ポンプとして心臓が働いているため流れが速いのに対し、リンパ液は主に骨格筋の収縮によって流れるため、その流れは緩やかです。

血液は一見すると液体に見えますが、細胞からなる有形成分と血漿に分けられ、細胞成分は赤血球、白血球および血小板の 3 種類に分けられます。さらに、白血球には好中球、好酸球、好塩基球、単球およびリンパ球の 5 種類があります。血液細胞はすべて骨髄の中で造られ、完成すると周囲の血管の中に入っていきます。骨髄で作られる赤血球は、最初は核がありますが、完成に近づくと核は消失します。哺乳類の赤血球の形状は扁平の両凹円盤状ですが、これは核が無くなってしまうことによって陥凹するためで、赤血球の表面積が大きくなるような形をしています（**図４**）。赤血球の大きさは動物種により異なり、人では平均 7.8μm、犬は平均 7.2μm ですが、馬は平均 5.5μm で小さく、これはその祖先が速く走る動物であったからなのかもしれません。サラブレッドの赤血球の大きさは小さく、人や他の動物に比べて体重当たりにおける血液量は非常に多いという特徴があり、血管内にギッシリと詰まった状態で体内を流れています（**表３**）。

血液は肺から新鮮な酸素を受け、腸管から栄養素などを取り込み全身に運ばれ、末梢に到達して

消費されて出来た二酸化炭素や各種代謝産物などを全身から集めて肺や腎臓に運びます。その他、血液には内分泌器官から分泌されるホルモン、赤血球、白血球および抗体などが流れ込み、それらを輸送して生体の防御や各種生理反応も行っています。また、一定の温度を保つ熱の輸送により体温調節（恒温動物）を行っています。さらに、生体の pH や浸透圧の調節を行い、恒常性の維持にも努めています。このように血液は様々な役目を果たしています。

表３　各種動物における赤血球の大きさ

動物種	人	犬	マウス	牛	猫	馬	羊	山羊
直径(μm)	7.8	7.2	6.0	5.9	5.6	5.5	4.8	4.0

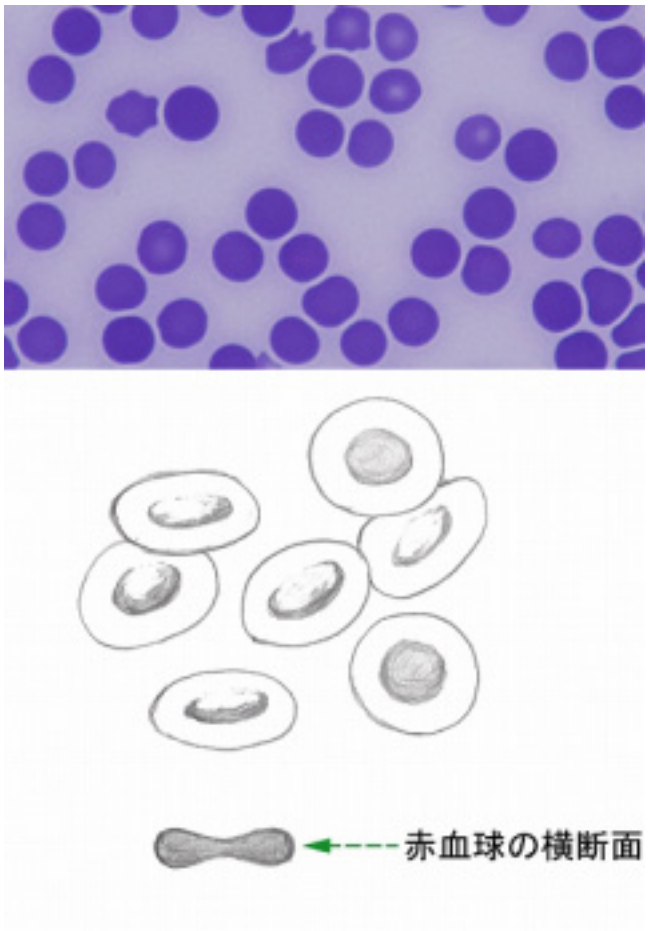

図４　赤血球の形状
哺乳類の赤血球は無核で形状は扁平な両凹円盤状をしており、核の消失により陥凹するため表面積が大きくなるような形をしています