

競走馬の呼吸器系と呼吸器疾患 その1

獣医病理専門医 獣医学博士

吉原 豊彦

今号では動物が生きる上で不可欠であり、特に競走馬が速く走るためには、酸素供給源として非常に重要な役割を果たす肺を初めとする呼吸器系の構造と機能を中心に解説します。

馬の呼吸器系の構造

動物はなぜ呼吸をする必要があるのでしょうか？呼吸とは動物と外部環境の間でのガス（酸素と二酸化炭素）交換を意味します。動物は呼吸することによって体内に酸素を取り込み、全身で消費してその間に産生された二酸化炭素を体外に排出しています。馬の呼吸を支えている呼吸器は、鼻の先端部にある鼻孔に始まり、さらに鼻腔、咽頭、喉頭および気管と続き、気管の途中で胸郭に入り、気管支で左右に分岐して左右の肺に分かれます。この鼻孔から胸郭に入るまでの部分は上気道という部分であり、胸郭内に収まっている部分の呼吸器は下気道と呼ばれ区分されています（表1）。

表1 気道とその区分

気道（空气の通り道）	上気道	鼻（鼻孔・鼻腔）、咽頭、喉頭
	下気道	気管、気管支、肺

1. 上気道

馬の鼻孔から入った空気は鼻腔に達しますが、馬では鼻の部分が高いため、薄い板状の複雑な構造の鼻腔を通過する時に空気は温度や湿度は上昇して咽頭および喉頭に達します。咽頭の下部には口蓋（鼻腔と口腔とを隔てる壁）があり、口に近い側の固い部分を硬口蓋、奥にある柔らかい部分を軟口蓋といいます。そして咽頭部の最も奥には喉頭蓋および披裂軟骨があります。喉頭蓋は飲食物を飲み込む時に気管の入り口に蓋をして、飲食物が気管に入るのを防止する働きをしています（図1）。咽頭部は空気を通る通路である気道（鼻腔→咽頭→喉頭→気管）と食べ物が通る通路（口→咽頭→食道）の交差点になっています。

なお、咽頭に至るまでは気道が背側（上部）にありますが、咽頭でその位置関係が逆転し、咽頭から後方は食道のほうが気管よりも背側に位置しています。

呼吸について、人は鼻と口の両方で呼吸が出来るのに対し、馬は鼻でしか呼吸が出来ないという特徴があります。これは咽喉頭部の構造が人とは異なっているからです。すなわち、人は喉頭蓋と軟口蓋が接しておらず、空気が口腔と鼻腔の両方から気管へ流入できる構造になっています。これに対し、馬は軟口蓋のすぐ後ろ側に喉頭蓋が接触しているため、飲食により嚥下するとき以外は、口腔側と鼻腔側の交通を遮断しています。このように馬は鼻からしか空気を吸い込むことができない構造になっています。



■：鼻腔 ■：咽頭 ■：気管 ■：口腔 ■：軟口蓋 ■：硬口蓋



図1 上図は馬と人の気道の相違、下図は馬の喉頭部の内視鏡像

2. 下気道

鼻孔から入った空気は喉頭を通過し気管に入ります。気管は喉頭から胸郭の気管支まで延びている管で、馬の気管は太く、楕円形の形状でアルファベットのC字状の気管軟骨が分節して配列し、太さが調節できるような構造をしており、骨組みがつぶれにくい素材で出来ています。気管の内面は粘膜で覆われ、その表面には線毛があり、その下には粘液腺があって喉頭方向に向かって絶えず鼻から吸い込んだ異物を排出するように働いています。気管は肺の入り口の手前で2枝に分岐して気管支となり、さらに細気管支を経て一層細くなり、終末気管支となり、最後は多数のブドウの房のように膨れた袋状の肺胞で終わっています。肺胞壁には網目状に毛細血管が分布し、ここで酸素が取り込まれ二酸化炭素の排出が行われます。

各種動物の肺は、基本的に左肺および右肺に分かれ、左右の肺はそれぞれ前葉、中葉および後葉からなり、さらに右肺には副葉があるという構造をしています。馬の肺は容積的に大きな器官ですが、他の動物に比べると、左右の肺ともに中葉が無く、左肺は前葉と後葉の2葉、右肺は前葉、後葉および副葉の3葉の計5葉で構成されており、しかも葉間裂がないため、外観では前葉と後葉の区分は明瞭ではないという特徴があります(図2)。

気管は胸郭内で2枝に分岐して左右の気管支となって左肺あるいは右肺に入り、その先で分岐を繰り返して細気管支となり、さらに枝分かれして終末気管支を経て肺胞管という微細な管に分かれ、ブドウの房状の肺胞囊に至ります(図3)。肺の中では気管支は二十数回分岐を繰り返しており、あたかも樹木の枝分かれに似ていることから気管支系統樹と呼ばれます(図4)。肺胞囊の壁は沢山の肺胞でできており、その壁は非常に薄く、毛細血管と接しており、この血管壁を介して酸素と二酸化炭素が交換されます。

呼吸器系の中で大きな容量を占めている肺は、膨張したり収縮したりすることのできるスポンジ様の構造をしています。心臓が収縮と弛緩を繰り返し全身に血液を送るポンプの役目を果たす特殊な筋肉で出来ているのに対し、肺自体は心臓と同じように能動的に収縮や弛緩を繰り返しているわけではありません。肺は肋骨と横隔膜に囲まれた胸腔の中に納まり、その表面は胸膜に包まれており、胸壁と密着しています。そのため、胸腔が広がれば肺も一緒に広がり、その分だけ空気が流入し、逆に胸腔の容積が小さくなると圧迫されて空気は外界に出ます。肺は呼吸のたびに膨らんだり縮んだりするため、肋骨に囲まれる壁側胸膜と肺の外側

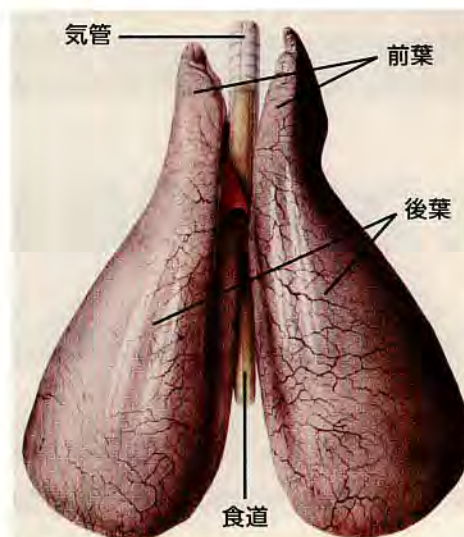


図2 馬の肺の外貌(背側から見た場合)
(Schmaltz,R.,Atlas der Anatomie des pferdes,1922)
馬の肺は左右葉に分かれ、左右葉はそれぞれ前葉および後葉に区分され、その構造は他の動物に比べてシンプルです

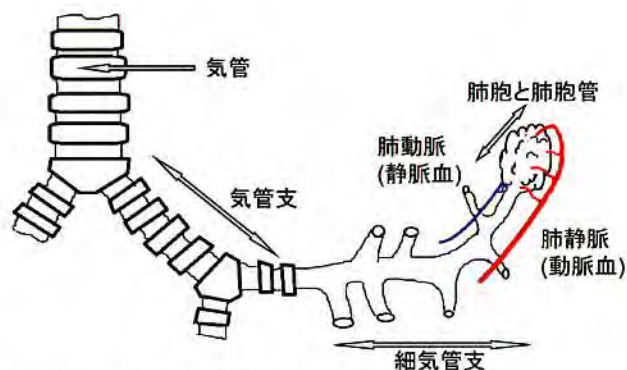


図3 気管支の分岐の模式図

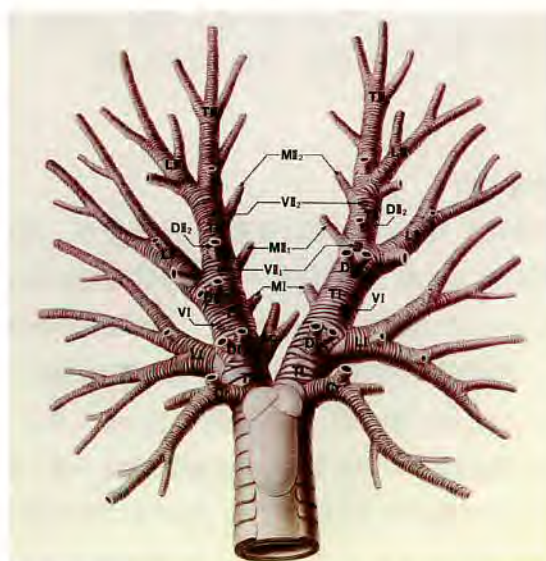


図4 気管支系統樹(JRA 競走馬総合研究所提供)
気管支は肺の中で20数回分岐を繰り返しており、樹木の枝分かれの様な構造をしていることから気管支系統樹と呼ばれます

を包んでいる肺胸膜とが収縮と弛緩に伴う摩擦で傷つかないうように胸腔内には少量の胸水を容れて滑沢にしています。

競走馬の肺活量は 40 数リットル、 人の 10 倍以上です

人では肺機能検査の一指標として肺活量を調べます。肺活量とは、人が息を最大限に吸い込んだ後に最後まで吐き出したときに測定される肺の容量をいいます。肺活量は性別や年齢によって異なりますが、標準的な肺活量の値は、男性では4～4.5L、女性では3～4Lとされています。しかし、馬は人の測定のように出来ないため、麻酔中に測定することになります。その際に測定された値は40～45Lで、これは人の10倍以上です。一方、競走馬の安静時の呼吸数は1分間に約10～15回です。1回の呼吸で肺に出入する空気量（1回換気量）は約5～6Lであることから、実際には1分間あたり50～90Lの空気が肺に出入りするといわれています。

馬の呼吸・循環機能を評価する方法には、馬の鼻孔部にオープンフローマスクを装着し、トレッドミル上で走行させて馬の呼気中のガス濃度を測定するオープンフローシステム（図5）が用いられています。本法は、心肺機能を評価する上で大きなウエイトを占める最大酸素摂取量が高精度で測定できるため、体力検査法としての利用価値は高いといわれています。一方、呼吸機能の潜在的異常（ブアパフォーマンス）によって十分走能力を発揮できない病態の診断には、酸素摂取量のみならず呼吸流量の測定が不可欠です。新しく開発された肺活量計の一種である馬用エルゴスピロメーター（豪州シドニー大学のグループが開発）は、酸素摂取量、呼吸流量および呼吸・循環機能のより詳細な評価ができることが実験で示され、体力検査から呼吸機能異常に起因するブアパフォーマンスの診断まで幅広く応用できる可能性があります。しかし、このエルゴスピロメーターは、既存のオープンフローマスク装着時の測定結果と比較すると運動中の心拍数や血中乳酸値が若干高く測定される傾向に

あります。これは、本装置の装着により呼吸時の抵抗が僅かながら増加することによると推察され、この問題が改善されれば、このエルゴスピロメーターは、競走馬の体力検査やブアパフォーマンス検査に応用できると思われます。

生体が生命を維持するにはエネルギーが必要であり、そのため細胞は食物中の栄養素を燃焼することによりエネルギーを生成します。この細胞内での代謝は内呼吸（組織呼吸）とも呼ばれ、必要な酸素を取り入れ内呼吸の結果生じた炭酸ガスを体外へ排出する機能は外呼吸（肺呼吸）ないし換気といえます。外呼吸によって肺胞内で毛細血管中に取り込まれた酸素量を酸素摂取量といい、内呼吸によって毛細血管から組織に取り込まれた酸素量は酸素消費量と呼ばれます。単位時間当たり生体が入り入れ可能な酸素の最大値（酸素を摂取できる能力の限界）が最大酸素摂取量（ VO_2max 、単位：ml/kg/min）です。最大酸素摂取量はスポーツにおいて全身持久力の最良な指標といわれています。酸素を摂取できる量は人でも馬でも個体で異なり、普通の人では約40ml/kg/min、一流長距離選手は約80ml/kg/minです。未調教の競走馬は約130ml/kg/minで、全身持久力（スタミナ）のある馬ほど大きいといわれ、一流競走馬は約190ml/kg/minあり、競走馬は生まれつき人より酸素摂取能力に優れており、速く走る秘密の一つとなっています。最大酸素摂取量は、トレーニングすることによって増強されることが分かっていますが、トレーニングにより増加する馬としない馬があり、遺伝的制約もあると考えられています。若馬の時に、将来競走馬になったときの最大酸素摂取量を誰も予測できません。すなわち、若馬の段階では速く走る素質があるか分からないため、どの馬も日々のトレーニングを地道に行っているわけです。

肺のクリアランス能

空気の通り道である気道や肺は空気を運ぶ経路やガス交換のための機能のみならず、吸い込んだ空気を浄化し、温めるとともに加湿もしています。馬は他の動物に比べると気道は長く、発達しています。鼻孔から入った空気には様々な異物（塵埃、細菌など）が混入していますが、これらの異物は、肺の終末にある小さな袋である肺胞に到達する前に、気管支の内面を覆う粘液層から分泌される粘液およびそこに無数に生えている線毛が咽喉頭の方に排出するように清浄装置として機能しています。これを肺のクリアランス（clearance）能といいます。この機構が正常に機能しなく



図5 オープンフローシステム

なると様々な異物が体外に排除されにくくなり、肺炎や気管支炎など呼吸器疾患に陥りやすくなります。

気道をたどっていくと一番奥にはブドウの房状の肺胞囊からなり、その壁はブドウの粒の形状に似た肺胞でできています。肺胞の壁は非常に薄く、毛細血管と接しており、ガス交換に都合が良くできています。肺胞の内面には表面活性物質 (surfactant) が分泌され、肺胞の表面張力を低下させて、呼吸の際に吸気の出入りに伴って常に肺胞がつぶれないように作用しています。肺サーファクタントは II 型肺胞上皮細胞に由来し、胎生後期より分泌が開始されます。その成分はリン脂質 (90%) およびタンパク質 (10%) で構成されています。肺サーファクタントタンパク質 (SP) は A~D (SP-A~D) が含まれています。血中 SP-A 値は II 型肺胞上皮細胞の過形成や肺胞の炎症などを反映し、呼吸器疾患の診断や病勢の判断に利用されます。

長距離輸送は肺の防御能を低下させます

肺の防御に重要な機能を果たす肺サーファクタントタンパク質に着目し、馬の肺機能の免疫学的測定系が JRA 競走

馬総合研究所で開発されました。すなわち、気管支肺胞洗浄液から得た肺サーファクタントタンパク質 A (SP-A) および D (SP-D) に対するモノクローナル抗体が作製され、次いで馬特異的肺サーファクタントタンパク質の ELISA 法による測定法が確立されました (帆保ら 2001)。そして、長距離輸送が馬の肺機能にどのような影響を及ぼすか評価することにこの測定系が利用され、その臨床的有用性が明らかになりました。すなわち、サラブレッド種実験馬 (30頭) を用いて馬運車による41時間の輸送実験が行われ、輸送の前後の気管支肺胞洗浄液中の肺サーファクタントタンパク質が測定されました。その結果、輸送後の馬の SP-A および SP-D の濃度は、輸送前の値に対してそれぞれ平均55% および36% 減少していました。この研究により新開発された馬サーファクタントタンパク質 SP-A および D の測定系は、気管支肺胞洗浄液中の肺サーファクタントタンパク質の検出および評価に非常に有用であることが確認されました。さらに、輸送実験による気管支肺胞洗浄液中の馬の肺サーファクタントタンパク質が有意に減少したことにより、長距離輸送は馬の肺機能、特に肺防御能を低下させることが初めて明らかとなりました。