技術講座

麻酔に必要な循環と呼吸の生理学 (1) 循環器

多川政弘

Pathophysiology of Circulation and Respiration for Anesthesia (1) Circulatory Systems

Masahiro TAGAWA

はじめに

犬, 猫をはじめとする動物 (当然ヒトも含まれる) は, 身体の構築の最小単位である細胞の維持と生命活動が正常に遂行されるためには細胞の重要な構造であるミトコンドリアへ酸素などの基質が適度に供給され, エネルギーを得るための燃焼が行われ, 好氣的な代謝の結果生じた炭酸ガスを排出することが必要であり, また, 代謝された糖や蛋白等の代謝産物を排泄するために正常な腎機能の維持が必要である。そのためには, 全身を循環する血液量 (犬で約 60 ml/kg, 猫で約 80 ml/kg) と血圧の維持並びに肺でのガス交換を適正な状態で維持することが極めて重要である。循環動態の変動は動物にとって最大の侵襲の原因となり, 交感神経系機能の亢進に加え宿主防御機能や免疫系を阻害する。また, 循環動態の変化から組織への血液還流量が低下すると虚血性の細胞または臓器障害を来す。適切な酸素の供給と呼吸の維持が周術期 (術前から術後にかけての期間) において生体を侵襲から保護して手術を成功させるた

めにも最も重要なポイントである。

1. 手術侵襲による循環系の変化

手術時の循環系の変動は前処置薬または麻酔薬の投与時点から始まる。この時点では心不全動物または心予備力の少ない老齢動物などでは麻酔薬などの投与によって代償機構が突然, 破綻し, 急性心不全または循環不全に陥る可能性が高い。また, 手術侵襲によって起こる生体反応は, 通常, 切開, 組織または臓器の牽引など手術操作によって起こる炎症と痛みに対するもので, 主に交感神経の興奮と内分泌系の賦活化である。それらの反応によって主に循環系の変化, すなわち心拍数の増加, 血管収縮, 心収縮力の増加, 体内血流の再分布が起こる。これらの変化は, いかなる麻酔を施しても阻止することは出来ない。侵襲の程度が小さい場合や動物の循環器系 (特に心機能の予備力) が正常であればそれらの変化は生理的範囲内で止まり, 問題は起こらないが, 高齢動物や心疾患を持つ動物のように予備力の少ない動物では侵襲の程度が大きくなればなるほど生理的範囲を越えて病的な状態, すなわち心不全または循環不全を起こす。その兆候として不整脈, 腎不全, 肝障害, 肺水腫などが発現する。

心拍数の増加は, アトロピンが投与されている

とマスクされる可能性があるが、通常、麻酔中に手術操作に合わせて心拍数増加を認めた場合、動物は痛みを感じていることを示し、そのままの麻酔深度では交感神経末端からのノルアドレナリンおよび副腎髄質からのアドレナリンの分泌亢進が起り、ともに末梢血管収縮がレニン-アンギオテンシン系の賦活とともに発現する（後負荷の上昇）。

2. 体循環と肺循環

生体において体循環は、心臓のポンプ力によって血液を末梢の器官へ送ってそれらの組織を血液で還流し、細胞のミトコンドリアへ酸素と栄養を供給し、細胞で産生された炭酸ガスと老廃物を体外へ排泄する。また、肺でのガス交換が正常に機能するためには肺循環が正常である必要がある。左心室から全身へ駆出される動脈は高圧系で平均で 80～100 mmHg 程度の圧を示す。一方で、右心室から駆出される肺循環は低圧系で平均 10～15 mmHg 程度である。両循環系は圧において大きな差はあるものの左右の心室から駆出される血液量（心拍出量）は等しい。

3. 前負荷と後負荷

心臓は生体が要求する酸素並びに栄養素を供給するために適切な血液を拍出する。その際、心予備力を有する健康動物ではその需要に見合った血液を問題なく拍出することができる。しかし、僧帽弁閉鎖不全、犬糸状虫症、肥大型心筋症などの心疾患を持ち、心不全を伴う動物では代償機序によって血中カテコラミン値が上昇し心拍出量を維持する。また、スターリングの法則に従い心筋の太さと長さを増して（心肥大）心収縮力を増大する。心不全状態が代償機序でカバーできなくなると、心のポンプ力が低下して体静脈または肺静脈のうっ滞を起こすようになる（うっ血性心不全）。

心不全の動物で問題になるのは全身または肺循環から心室内へ還流してきた血液の量が多ければ多いほど心臓にとって重荷となることである（前負荷の増大）。一方で、末梢血管が収縮して血管

抵抗が大きいと（後負荷の増大）、需要に見合った血液量を駆出するためには心臓はより大きな仕事量を課せられることになる。心臓のポンプ力の低下、すなわち心筋抑制は麻酔薬によっても起こるために、心不全動物ではその状態がより悪化することになる。

4. 前負荷と後負荷の軽減

心不全動物または老齢動物のように心予備力の少ない症例の麻酔管理を行なう場合、これら前負荷および後負荷に対する軽減処置が必要である。

(1) 前負荷の軽減

静脈からの血液還流量の増大に伴い心室内の血液量（前負荷）を減ずるためにあらかじめ利尿剤を投与して循環血液からの除水をはかる。一方で、肺水腫の発現が危惧される場合では、重荷となる循環血液量を増加させないために輸液量を 3～5 ml/kg/時程度に抑える。ただし、出血量の増加、腹腔内操作すなわち手術侵襲が多きくサードスペースへの体液の移動が予測される場合、強心剤を投与しても血圧が上昇しない場合、循環血液量の不足から尿量が確保できない場合など様々な状況に応じて輸液量を増加させることを考慮する。これらの判断は、決して容易なものではなく、種々のパラメーターをモニター（脈圧、血圧、尿量など）しながら先手先手で対応する必要がある。

(2) 後負荷の軽減

後負荷である末梢血管は、痛み、血圧低下などによってカテコラミンを介して収縮するが、通常用いられるフェノチアジン、ドロレプタンなどの鎮静薬やバルビツール酸誘導体、イソフルレンなどの麻酔薬は、 α_1 ブロッカーとして働き血管拡張を起こすために後負荷は軽減される。しかし、鎮静薬、麻酔薬による心筋抑制効果によって起こる血圧下降から腎臓、肝臓などの末梢循環は低下することになる。これらは前負荷とともに悪循環として循環動態を抑制し、術後に起こる虚血性腎不全、肝不全の原因になるためドパミン、ドブタミン、アクトシンなど末梢血管拡張作用（とくに腎動脈）のある陽性変力作用を有する薬剤の投与

が必要である。

5. 循環動態の評価

循環器系の評価をする際、 $\text{BP} = \text{CO} \times \text{TPR}$ の関係を考える必要がある。また、心拍数を考慮すれば、 $\text{BP} = \text{一回拍出量 (SV)} \times \text{心拍数 (HR)} \times \text{全末梢血管抵抗}$ となる。通常、臨床の現場では脈圧（股動脈または舌下動脈触知圧）または血圧および心拍数を測定して循環系を評価する。また、尿量を測定することは末梢循環の状態の指標として重要であることは言うまでもないと思う。一応、血圧または脈圧は心機能の目安として有用ではあるが、それらの変化が心拍出量によるものか、末梢血管抵抗によるものか、または両者の合併したことに起因するものかについて推測し、その変化に対して適切な処置をしなければならない。麻酔中の血圧低下、末梢血管抵抗の上昇（とくに痛覚による交感神経系機能の亢進に起因する）が持続すると、末梢循環不全（または障害）を来し、肝臓、腎臓等の主要臓器の虚血から、術中から術後にかけてそれらの臓器の機能障害の悪化または機能不全を招来することになる。

6. 循環動態に関するモニターの重要性

麻酔および手術侵襲はそれ自体が生体にとってストレスとなり、循環、呼吸、体液バランスなどの変動が術前から術後にかけて刻々と起こる。それらの変動は血圧の低下、不整脈、尿量の減少または停止など様々な症状または兆候として発現するが、臨床獣医師はそれらの変動を予知し、それら症状の発現から起こる生命の危機に先手先手で対処する必要がある。それらの変動を知る上で種々のモニターの使用が重要である。現在、獣医療で利用出来るモニターを表に示す。この中で、体温、脈拍、脈圧、尿量は、重要な生体のモニターであるがコストが低く、技術面で容易に行なえるため日常の診療において必須のものとすべきである。医療の発達に伴って手術室における循環、呼吸を

始めとした生命維持に必要なモニター機器が開発され、獣医療においても利用されるようになってきた。

7. 循環改善薬の使用

鎮静薬、鎮痛薬および麻酔薬の多くは、 α 遮断または内因性カテコラミン抑制として働き、また用量依存性の心筋抑制をおこす。そのために十分な麻酔効果並びに鎮痛効果を得ようとすると血圧低下、心拍出量の減少が必ず起こることになる。一方、疼痛は大きな侵襲としてカテコラミンを上昇させ、心拍数、血圧は上昇するものの末梢血管が収縮するために組織還流が低下することになる。麻酔管理の目的の一つとして、麻酔深度を適切に維持して麻酔薬の過剰投与を防止し、なおかつ十分な鎮痛効果を得ることにある。この様な臨床麻酔の実施において循環動態の変化なしに行なうことは實際上困難である。そこで著者は、以下に示すような薬剤を周術期における循環の管理のために使用している。

(1) ブクラデシンナトリウム（アクトシン）

ブクラデシンナトリウムは、一般名が dibutyryl cyclic AMP (DBcAMP) でサイクリック AMP (cAMP) の誘導体で細胞膜を容易に通過でき陽性の変力作用（強心効果）と血管拡張効果を有する一方で、肝臓など主要臓器のエネルギー源として作用し、副作用もほとんど無いことから循環管理の第一選択薬として使用することができる。

(2) ドパミン（イノバン）

ドパミンは、ノルアドレナリンの前駆体で、 α , β の両方の交感神経刺激効果を有し、強心効果に加えてとくに腎動脈の拡張作用から腎血流量を増加させて利尿をはかる。3～5 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{分}$ の低用量から開始するが経過とともに所謂 down-regulation が起こり、ドーパミンレセプターの減少によって高用量の投与を余儀なくされることになる。通常、10～15 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{分}$ 程度の用量では心収縮力は増強するが心拍数も増加し不整脈が発現するようになる。さらに、高用量では α 作用が

表 循環および呼吸器系のモニターの種類とその評価項目

1. 心電図モニター：心拍数，不整脈の有無，心筋の電氣的変化
2. パルスオキシメーター：動脈血液中の酸素飽和度，脈圧の指標
3. 血液ガス測定装置：血液中の酸素および炭酸ガス分圧，酸塩基平衡
4. ドップラー血圧計：主に末梢動脈の最高血圧
5. レーザー血流計：末梢血管の血流量
6. カプノグラム：呼吸または吸気中炭酸ガスおよび酸素濃度
(吸入気の酸素濃度および動脈血液の炭酸ガス分圧の指標)
7. 換気量計（レスピロメーター，スパイロメーター）：換気量
8. 尿量：末梢循環（正常値は2～3 ml/kg/時程度）
9. 脈圧（股動脈，舌下動脈など）：血圧または心拍出量の目安
10. 可視粘膜または血液の色調：循環動態または酸素化の程度
11. 出血の度合（特に末梢の動脈からの出血の仕方）：血圧の指標

強く発現することから末梢血管抵抗が増加し，不整脈発現頻度も増加する。以上のことから本剤は必ず心電図モニター等の監視下で5%グルコース液などに希釈して微量持続点滴投与する。

(3) ドブタミン（ドブトレックス）

ドブタミンは，選択的な β 受容体刺激作用を有し，心収縮増強作用はドパミンよりも協力である。また，不整脈発現頻度はドパミンよりも低い，腎血流量の増大はほとんど期待できない。用量および用法はドパミンとほぼ等しい。

注. 心不全動物では血中のカテコラミンレベルが上昇しているのに反して，心筋内のカテコラミンレベルが低下している。Down-regulation は，

心臓に位置するドーパミン受容体が既に減少し，また，外部からドーパミンを投与することによってドーパミン受容体が減少してゆく現象である。そのためドーパミンの用量が漸次増加することになり，ドーパミンの代謝産物であるノルアドレナリンまたはアドレナリンが血中に増加して心室性不整脈を発現するため通常，ドーパミンの使用は48～72時間で打ち切らざるを得ないとされてきた。しかし，現実的には循環動態，すなわち強心および末梢循環を改善する目的でドーパミンを使用する場合，それ以上の長期に亘って使用可能であり，down-regulation はメチルプレドニゾロンなどのステロイドによってある程度防ぐことができる。