

この結果から特に注目すべきことは、手に何も持たない時でも、二頭筋は前腕の重さの3倍の張力で前腕を引き上げ、肘関節は前腕の重さの2倍の力で前腕を押し下げていることである。さらに、前腕の先の部分にもものを持つだけで、腕の内部では、二頭筋は、ものの重さの約10倍もの張力で前腕を引き上げ、肘関節は8倍もの力で前腕を押し下げて、つり合いを保っている。こうした仕組みの大きな利点としては、筋肉が収縮できる長さには限界（二頭筋の長さ約25cmに対して最大収縮の長さ7cm程度）があり、荷重点である手先の稼働範囲が7倍の50cmに拡大され、可能な移動速度も7倍となることである。

同じ形の持ち方は、ボウリングの投球フォームにも見られるが、ボウリングのボールは15ポンド（約7kg）前後と重く、構えるだけでも二頭筋や肘関節には500N、つまり、45～55kg重に近い力が作用している。

**例2** 片足で立つときの筋力の方向と大きさ

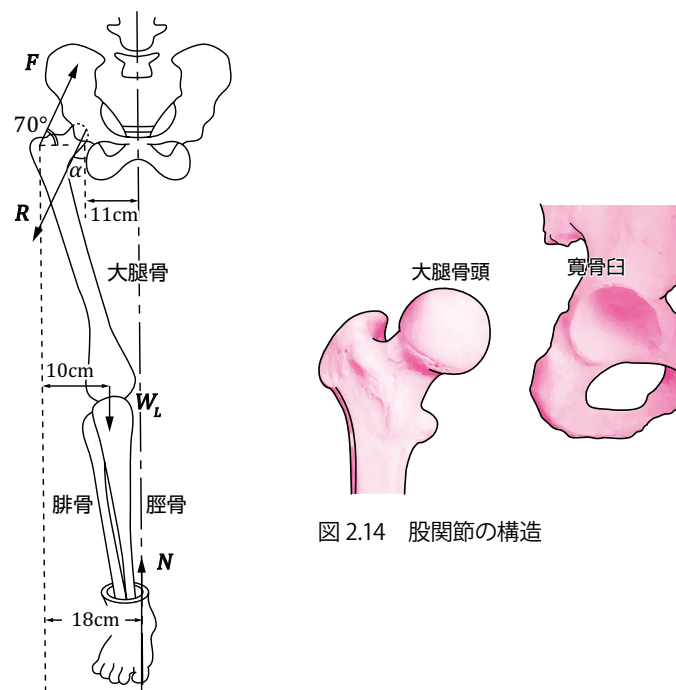


図 2.13 片足で立っているときの下肢の図<sup>(4)</sup>

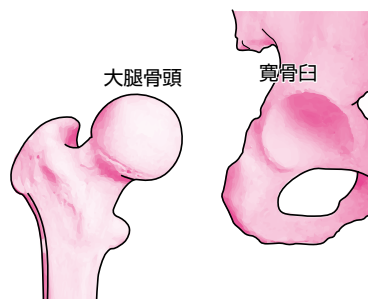


図 2.14 股関節の構造

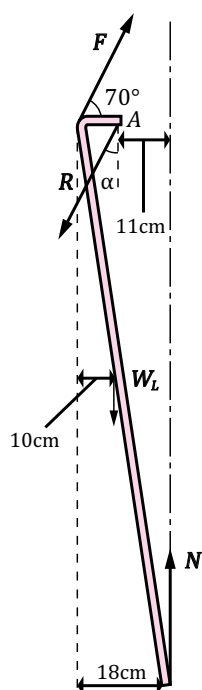


図 2.15 モデル図

片足で立っているときの下肢の図が、図 2.13 に与えてある。骨盤と下肢は、図 2.14 のように、骨盤の寛骨臼と大腿骨の球状の大腿骨頭からなる股関節でつながっており、外転筋の力で下肢を斜め上に引き上げている。大腿骨は大腿骨頭部分と長い骨本体が約 125°の角度をなす逆 L 字型をしており、外側に外転筋の腱が付いている。

この大腿骨の形状は、人類が両生類から爬虫類、さらに哺乳類へ進化した過程で得られたものであり、トカゲなどのはう歩行様式から進化した4足歩行の哺乳動物が、地面を蹴って歩行するのに都合の良い形になっている。また、大腿骨、腓骨・脛骨の線が中心線に向かって内側に傾いているのは、類人猿にない人類に特有の形状である。

図 2.15 のように、外転筋の力  $F$  は水平と  $70^\circ$  をなし、 $R$  は寛骨臼が大腿骨に及ぼす力、 $N$  は床が足に及ぼす力で、これは身体全体に働く重力  $W$  に等しい。 $W_L$  は下肢にかかる重力で  $\frac{W}{7}$  とする。

大腿骨、腓骨、脛骨からなる下肢全体を1つの剛体と見なし、この部分にかかる力に注目してモデル化すると図 2.15 となる。

**問題**

$F$ 、 $R$  の大きさ、および  $R$  が鉛直となす角  $\alpha$  を求めよ。

**解答**

図 2.15 において、水平方向右向きに  $x$  軸、鉛直上向きに  $y$  軸を選ぶと、 $x$  軸方向の力のつり合いより

$$F \cos 70^\circ - R \sin \alpha = 0$$

$y$  軸方向の力のつり合いより

$$F \sin 70^\circ - R \cos \alpha - W_L + N = 0$$

図の A 点周りの力のモーメントのつり合いより

$$-7F \sin 70^\circ - 3W_L + 11N = 0 \text{ となる。}$$

$N = W$ 、 $W_L = \frac{W}{7}$  を代入して（計算は関数電卓を活用）、 $F = 1.61W$ 、 $R = 2.37W$ 、 $\alpha = 13.1^\circ$  が得られる。

仮に、下肢が1本足で鉛直に立ち骨盤を支えるだけであれば、下肢は寛骨臼からほぼ体重の重さ（片足の下肢部分の重さを除く）を受けるだけであるが、運動能力を得るために変化した股関節の構造のために、体重の約 1.5 倍の筋力と 2.5 倍の関節からの力が必要となっている。

**例3** 脊柱にかかる力

図 2.16 は人間の脊柱の構造を示している。

脊柱は、液で満たされた椎間板で分けられた 24 個の椎骨でできている。ここでは、人が背中を水平に曲げた姿勢で重い物を持ったときに、脊柱にかかる力の大きさを計算する。

図 2.17 は、こうした姿勢で重い物を持っているときに、脊柱を仙骨に支点をもつ剛体と見なして、これに作用する力に注目して描いたモデル図である<sup>(5)</sup>。

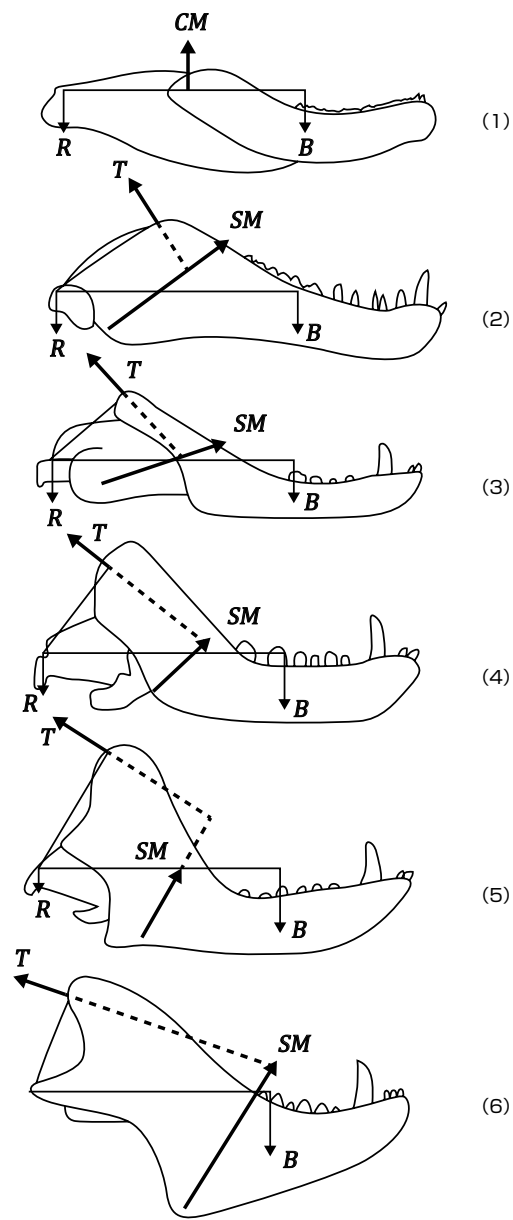


図 2.21 Crompton, A.W. & Parkyn, D. G. (8) による哺乳類型爬虫類の下顎の形態的進化図

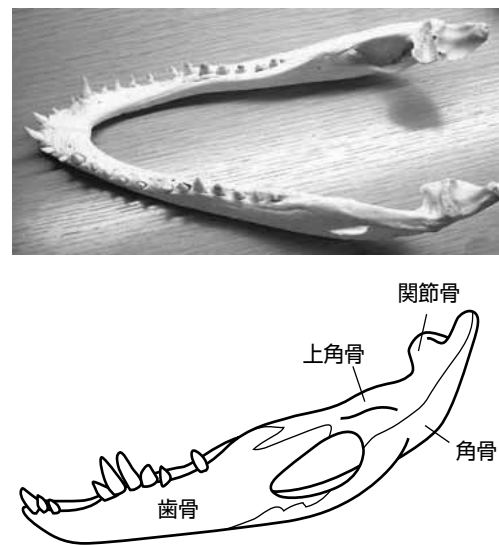


図 2.22 ワニの下顎骨とその構造

①のラビドザウルスと同じ様式の下顎をもつ現代の爬虫類であるワニ (Alligator) の下顎の写真と構造を図 2.22 で示している。

この下顎の形態学的特徴を静力学で説明すると次の図 2.23 のようになる。

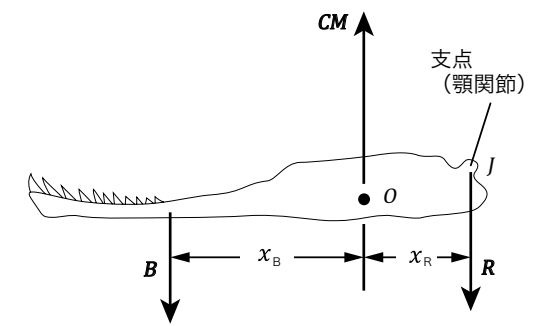


図 2.23 ワニの下顎の静力学的モデル図

垂直方向の力の釣り合いから  $CM=B+R$ 、0 点の周りの力のモーメントの釣り合いから  $x_B \times B = x_R \times R$  が成立するので、 $CM = B(1 + \frac{x_B}{x_R})$ 、 $R = B \times \frac{x_B}{x_R}$  となる。たとえば  $x_B$  が  $x_R$  の 2 倍で、噛む力  $B$  を 1N (ニュートン) とすると、必要な筋肉の力  $CM$  は 3N で 3 倍、関節にかかる力  $R$  は 2N で 2 倍になる。つまり、噛む力  $B$  は、関節にかかる力  $R$  の半分であり、筋肉の力  $CM$  をいくら増強しても、下顎がこの形であるかぎり、顎関節の耐える力の限界が噛む力の限界を決めていることがわかる。

次に図 2.21 ⑥ディアルトログナトゥスの下顎に近い構造をもつ現代の哺乳類の下顎の形の特徴は、次のように表される。

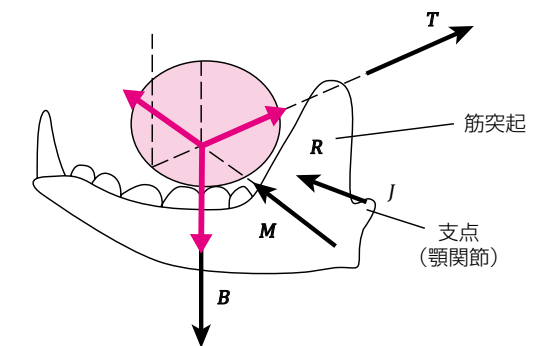
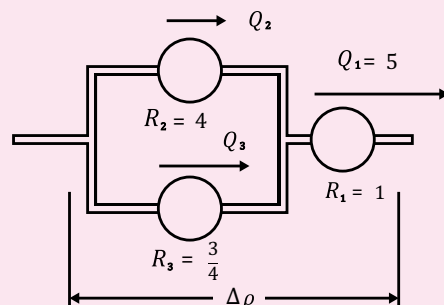


図 2.24 現代の哺乳類の下顎の形態と静力学的モデル図

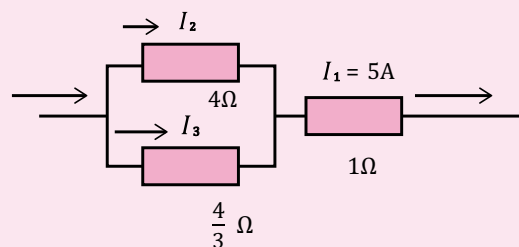
下顎には、図のように食物を噛むときに食物から受ける力  $B$  と側頭筋から受ける力  $T$  と咬筋から受ける力  $M$ 、顎関節から受ける力  $R$  がかかっている。力のベクトルは作用線を動かしてもその作用は変わらないので、 $B$  と  $T$  と  $M$  を赤い矢印のように移動させ、それらが 1 点で交わり、ベクトル的にゼロになれば、この下顎は顎関節からの力  $R$  が無くても十分につり合うことができる。この条件は、ベクトルの和を表す式で書けば、 $T+M+B=0$  のように書くことができる。

静力学的に表現すれば、爬虫類から哺乳類への進化において、下顎に筋突起ができて、爬虫類の顎筋が分化した側頭筋がこの筋突起に付いたため、咬合において顎関節にかかる力がほとんどゼロ、またはきわめてゼロに近い状態が実現したこと、加えて、2 種類の筋力により咀嚼能力 (力と機能)



**解答**

このままで解いても平易な問題であるが、参考のために電気回路に置き換えてみる。



左側の並列つなぎの抵抗の合成抵抗値は、 $\frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{3}{4}} = 1\Omega$  となり、回路全体の抵抗は  $2\Omega$  である。全体を流れる電流は  $5A$  であるので、回路の両端にかかる電圧は  $10V$ 、また左側の並列つなぎの抵抗にかかる電圧は  $5V$  であるので、 $I_2 = \frac{5}{4}A$ 、 $I_3 = \frac{15}{4}A$  が得られる。流動抵抗の問題であるので、答は単位のみを変更すればよい。

答 全体の圧力降下  $10\text{mmHg}$ 、 $Q_2 = \frac{5}{4} \text{ cm}^3/\text{s}$ 、 $Q_3 = \frac{15}{4} \text{ cm}^3/\text{s}$

**4.4 ヒトの血液循環系**

**1. 血管床の流動抵抗**

図 4.16 はヒトの血液循環系の模式図を表している<sup>(11)</sup>。

ヒトの血液循環系は2つの循環系からなる。1つは肺循環系（右心系）と呼ばれ、大静脈から来た酸素の欠乏した血液が、心臓の右心房から右心室、肺動脈を経て肺に送られ、酸素を供給されて肺静脈を経て心臓の左心房に到達する系である。

肺動脈での血圧は平均で約  $15\text{mmHg}$ 、肺静脈での血圧は  $5\text{mmHg}$  以下とされている。

もう一方の循環系は体循環系（左心系）と呼ばれ、心臓はこの系により左心房で受け取った酸素

を多く含む血液を左心室から全身に送り出す。血液は大動脈を通り各器官に到達し、各器官の血管床と呼ばれる小動脈や毛細血管、小静脈からなる血管組織を経て大静脈に集まり、心臓の右心房に到達する。この体血液循環系を扱ううえで、これから記憶すべき典型的成人の心臓血管系のパラメータは次のとおりである。温度は通常体温である  $37^\circ\text{C}$  とする。

(1) 体循環系の太い動脈系での収縮期圧は  $120\text{mmHg}$ 、弛緩期圧は  $80\text{mmHg}$  で平均血圧は、弛緩期の時間が収縮期の時間の2倍であることを考慮すると  $93\text{mmHg}$  となる。静脈での圧力は  $5\text{mmHg}$  であり、約  $90\text{mmHg}$  の圧力差で血液を循環させている。

(2) 血液量は  $70\text{kg}$  の成人男性で約  $5L$  ( $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ) で、安静時に身体を1回循環する時間は  $50$  秒～ $60$  秒であり心拍数は毎分  $60$  前後である。

(3) 血液の密度は  $1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  であるが、概算では  $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  として差支えない。全血液の粘性係数は、その組成や血管の内径の違いにより変化し、一定ではないが、ここでは全体の血液循環の定性的な理解のため、すべて  $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} = 4\text{mPa}\cdot\text{s}$  (ミリパスカル秒) =  $4\text{cP}$  (センチポアズ) として計算を行う。

表 4.3 は文献 11 のデータから引用した横になって休息している成人の各血管床での血流量  $Q$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) および流動抵抗  $R$  ( $\text{mmHg}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$ ) の値を示している。合わせて血流量と流動抵抗から  $\Delta P = Q \cdot R$  で計算した各器官の血管床の両端にかかる圧力差  $\Delta P$  が右欄に青字で書き込んである (単位:  $\text{mmHg}$ )。

図 4.16 と見比べてみると、肺循環系と体循環系は直列につながっており、右心室から駆出される血液の量は左心室からの拍出量に等しく、この例では  $97\text{cm}^3/\text{s}$  となっている。体循環系では、脳、腕と肩、気管支、心臓、他の器官、腎、皮膚、脚の各血管床は並列に配置されており、このため、各器官にかかる圧力は等しく、各血流量は各血管床の流動抵抗に依存する。大動脈から供給される約  $90\text{mmHg}$  の圧力差をもつ血液は各器官に供給され、各器官は必要な血液の流量を確保するための適切な流動抵抗を持っている。

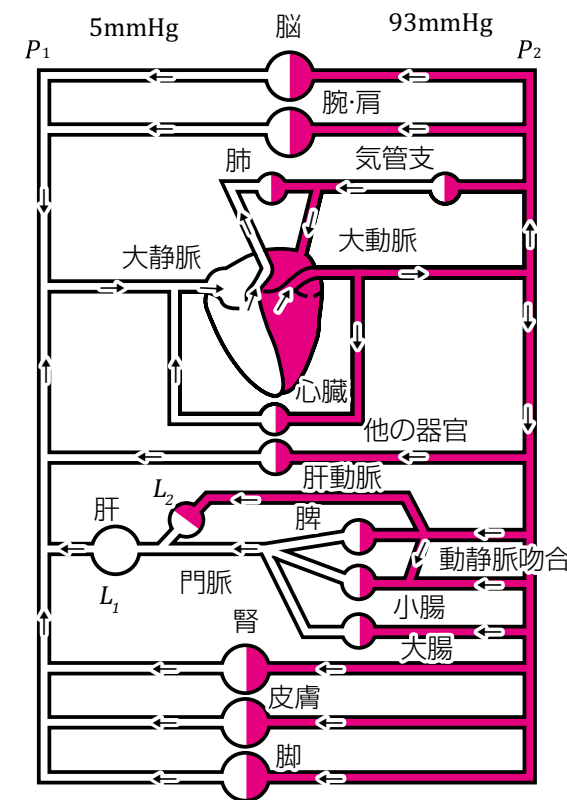


図 4.16 ヒトの血液循環系 (上段の  $P_2$  は体循環系の動脈系の圧力、 $P_1$  は静脈系の圧力を表している)