埼玉医科大学進学課程紀要　第7号（1998年）

生物関連の題材を用いた力学の基礎教育の体系

赤間啓一[1]・赤羽　明[1]・勝浦一雄[1]・向田寿光[1]・林　昌樹[2]

要旨

物理学は本来，生命非生命を問わず，自然現象解明の基本となる学問であり，近年の生命科学の進展において重要な役割を担っている．このような認識から，我々は，生命非生命にバランスのとれた題材を用いた物理学の基礎教育体系の構築を提唱している．ここではその一環として構成した力学分野の体系における生物関連の教材を紹介する．

近年の分子生物学，バイオテクノロジー，高度医療技術など，生命科学分野の進展には著しいものがあるが，それは，背景に物理・化学的な自然・生命の理解の進歩があってはじめて可能になるものであり，生命科学を目指す学生に対しても，あるいは一般の学生に対しても，今こそ基礎物理教育の充実が望まれる時である．しかるに，今日の物理学の基礎教育は多くの場合非生命的な題材によって組み立てられている．その結果，学生，生徒は，ややもすると「物理法則は生命系には無関係である」という錯覚に陥り，特に生命科学系の学生は基礎物理修得の意欲を失い，ひいては生命科学自体を正しく理解できなくなる恐れがある．我々は長年，医学部，生命科学部の基礎物理教育を手掛けてきたが[1]，その経験を基に，生命非生命の教材にバランスのとれた物理学の基礎教育の体系の構築を提唱したい．即ち，従来，物理の概念，法則の例として挙げられている非生命的な現象と同時に生命の関与する現象やそれに関わる測定や応用の技術の例を用いて体系を編成するのである．

我々の提案は次のような基本的認識に基づく．物理学は自然界の基本法則を探求し，それによって諸現象を解明し，また応用に供する学問である．生命現象も物理法則に支配されており，物理学の重要な対象である．生命系は複雑であるから，かつては物理のレベルからの解明や応用は困難であったが，諸科学の急速な発展により今やそれが可能となり，着実な成果が上がっている．その発展を支える基礎教育においても，即応した改革が必要な時である．

1.埼玉医科大学物理学教室
2.東京薬科大学生命科学部

我々はこのような体系によって次のような効果を期待している．(1)生命現象も物理法則に従うことを認識させ，生命を深く理解し応用する上で物理学の概念や知識が有益かつ不可欠であることを実感させる．(2)初等中等教育の生徒や大学の一般の学生に対して，生物的な例をバランスよく取り入れることによって，非生命的な現象と同時に生命現象の物理に対する認識を深めさせ，物理学や生命科学の的確な理解を促して幅広い教養の基礎とする．(3)特に医学や生命科学を目指す学生に対しては，関心の高い生命現象や医療技術の例を取り入れることによって，ややもするとありがちな物理学への疎遠感，抵抗感を取り除き，生物学，生理学，生化学や専門の諸学科を学ぶための基礎とする．

我々は生命の関与する題材は物理の例示の部分に入って来ると考えている．抽象的な物理の概念や原理自体は，非生命的現象だけでなく，生命的なものも含む全ての現象を対象としている．生命的，非生命的といった区別は具体例の中で初めて現れる．例示は概念，原理を抽出，帰納する段階と，具体的現象に適用し，応用する段階で重要な

役割を担う．我々は基礎教育においてこのような例示を非常に重視している．それは，単に例示によって原理の理解を助けるためというだけでなく，抽象的な概念，原理が自然の中でどう実現しているかを理解し，自ら応用できるようになって初めて，その物理を本当に理解したといえると考えるからである．

非生命現象に関しては，先輩諸氏の長年の実践を通して，様々の複雑な現象の中から教育に適した単純な例が抽出・蓄積されて来た．我々のなすべき作業は，生命の関わる現象に関して，そのような教育に適した例を抽出し，具体的な体系の中に組み込んでいくことである．生命系は非生命系に比べて複雑なので例は厳選吟味して抽出する必要がある．このような試みはすでに多くの医学，生物系の学部の基礎教育においてなされており，教科書も出版されている[２]．しかし，ここで目指しているのは，生物物理や医用物理の教育体系や，医学や生命科学に進む学生のためのアドバンストな物理教育体系ではない．あくまで一般物理の基礎教育において，物理法則や概念の例として，生命の関与する現象をバランスよく取り入れた体系である．従って例示は生命科学の観点からは平易なものに限るべきであり，物理としても標準的な基礎教育のレベルを逸脱すべきではない．

我々は実際にこのような考えのもとに多数の教材を収集し，教育体系の中に組み込み，大学の医学部，生命科学部，工学部での基礎教育の実践を通して検討，吟味してきた[３]．ここでは，このような試みの一環として構成された力学分野の体系で用いた生物関連の教材を紹介したい．

標準的な力学の一般教育の体系にならって，内容を次のように章別する．

１．運動　速度，加速度など運動に関する諸概念の導入し，例としての等加速度運動などを論じる．

２．運動の法則　簡単な例から慣性，力の概念を導入し，ニュートンの運動法則を帰納し，運動の求め方を論じる．

３．様々な運動　放物運動，円運動，振動などを論じ，また，慣性系，慣性力，遠心力などの概念を導入する．

４．仕事とエネルギー　仕事，エネルギーの概念を導入し，力学的エネルギー保存の法則を導き，応用する．

５．力積と運動量　力積，運動量の概念を導入し，運動量保存の法則を導き，応用する．

６．剛体　質点系，重心，剛体，トルクなどの概念を導入し，つりあいの条件とその応用を論じる．次に角加速度，角運動量，慣性モーメントなどの概念を導入し，回転の運動方程式，回転の運動エネルギー，角運動量保存の法則を導き，回転運動，振動などを論じる．

７．弾性体　応力，ひずみ，弾性，塑性，弾性率，極限応力などの概念を導入し，弾性体の変形，破壊などを論じる．

８．流体　流線，定常流などの概念を導入し，連続の式，完全流体のベルヌーイの定理を導き応用する．層流，乱流，粘性などの概念を導入し，ポアズイユの法則を導いて応用し，また，レイノルズ数，流動抵抗などを用いて流れの状態や，流量を論じる．表面弾力，毛管現象について論じ，球殻，管の張力と内外圧に関するラプラスの法則を導き，応用する．

以下これを順次見ていきたい．

１．運動

速度，加速度，自由落下の例として次のものを用いる．

例 1.1　飛び込み　水泳の高飛び込みのコマ撮り写真またはその模式図（図１）を示し，落下距離 x m と時間 t 秒の関係を表す２次式 $x=4.9\,t^2$ を抽出，速度，加速度の概念を導入，加速度が一定である事実を抽出する．

次に等加速度性から逆に一般の放物体，一般の等加速度運動を導く．よく使われる非生命的な例とともに次のような生物的な例を論じる．

例 1.2　スタートダッシュ　短距離走のレースにおいて，スタートダッシュを等加速度運動，その後は等速運動として，例えばスタートダッシュの

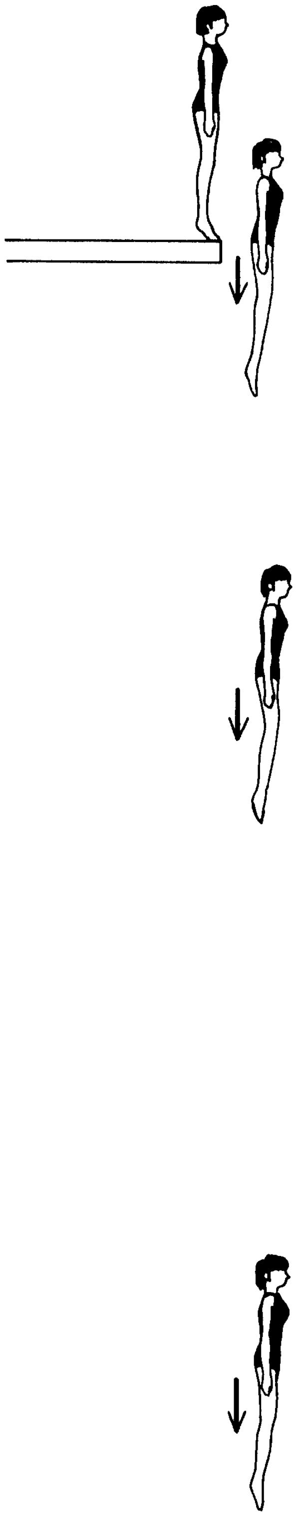


図1． 高飛び込み　自由落下運動の例

加速度，時間を与えて全行程の所要時間を求める．例えば100 mのレースで，ある選手が初めの2秒間，一定の加速度5 m/s²で加速し，その後ゴールまで等速で走ったとすると，加速している間に走る距離は½(5 m/s²)(2 s)²＝10m，よって残りの距離は90m，2秒以後の速度は(5m/s²)(2s)＝10m/sだから残りの時間は(90m)/(10m/s)＝9 s，よって全所要時間は2 s＋9 s＝11 sとなる．

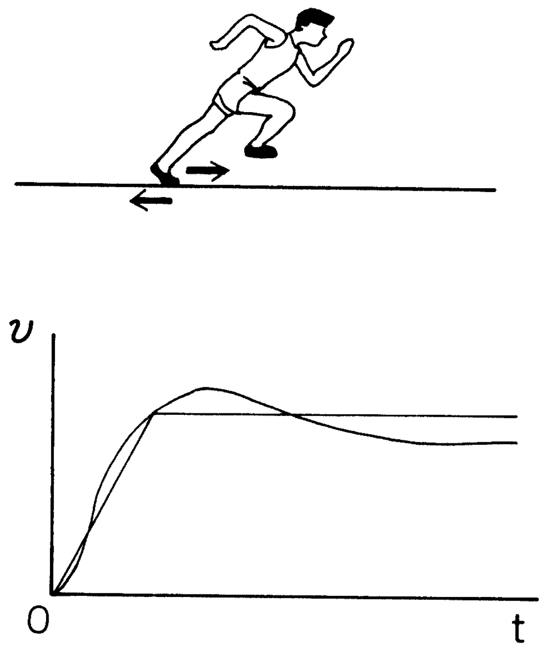


図2． スタートダッシュ　等加速度運動の例

実際のレースにおける典型的な速度の変化を図2に示す．必ずしも等加速度運動と等速度運動にはなっていないが，近似的にはそのように扱える．ちなみに等加速度の例としてしばしば用いられる自動車や電車も実際は等加速度では走行せず加速度は変化している．このような例から，逆に一般の変化する加速度について考えさせ，また，近似，単純化の意味を認識させることもできる．

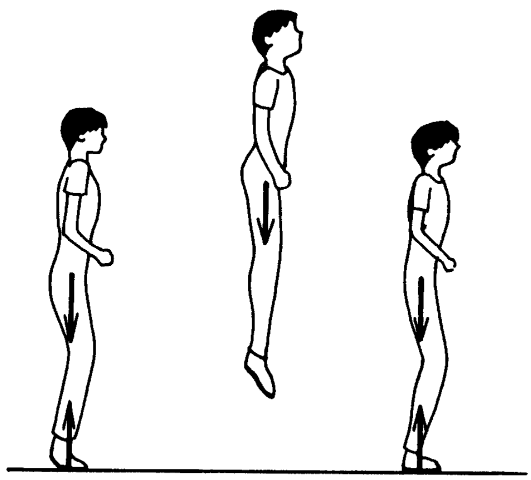


図3． 飛び上がる運動　等加速度運動の例

例 1.3　飛び上がる運動　立っているひとが真上へ飛び上がる運動（図3）について，はじめの地面を押す運動，地面を離れた後の放物体運動，着地後地面を押す減速運動をそれぞれ等加速度運動と仮定して，移動距離，最高点，時間，速度，加速度等の関係を論じる．前方へ飛び出すとして2次元的な放物運動の上昇距離，水平到達距離，時間，速度，加速度等の関係を論じる．

例 1.4　立ち上がる運動　ひとが立ち上がるときの上半身の運動（図4）について前半，後半をそれぞれ加速，減速の等加速度運動と仮定し，移動距離，時間，速度，加速度等の関係を論じる．これらの運動の扱いは厳密に言えば，体の変形等があるので難しい．本来なら質点系や重心の概念を導入して重心の運動として扱うべきであるが，この段階では詳しくは触れない．

例 1.5　大動脈血の運動　ある測定によれば，大動脈血の速度（図5）は，心臓の収縮により，$t_1 = 0.02$ s 間，加速度 $a_1 = 60$ m/s^{2}で等加速度的に加速し，その後心臓の弛緩により加速度$a_2 = -4.0$m/s^{2}で等加速度的に減速して，速度が0になった瞬間，大動脈弁が閉じ，次の心収縮までの間，大動脈血は停止する[4]．このことからそれぞれの時期に大動脈血が進む距離や弁が閉じるまでの時間を考えさせる．結果は加速期に $x_1 = ½\, a_1 t_1{}^2 = ½(60\ \mathrm{m/s^2}) \times (0.02\ \mathrm{s})^2 = 1.2$ cm 進み，速度は $v_1 = a_1 t_1 = (60\ \mathrm{m/s^2}) \times (0.02\ \mathrm{s}) = 1.2$ m/s まで増えるので，減速期の初速度は $v_0 = 1.2$ m/s になる．減速期は速度が0になるまでの時間だから $v_2 = a_2 t_2 + v_0 = 0$ より，$t_2 = -v_0/a_2 = -(1.2\ \mathrm{m/s})/(-4.0\ \mathrm{m/s^2}) = 0.3$ 秒間で，その間に $x_2 = ½\, a_2 t_2{}^2 + v_0 t_2 = 18$ cm 進む．減速期に大きく進むことの意外性は初学生の興味を引きつける効果がある．弁が閉じるのは速度がゼロになるときであり，微分をゼロとおいて時間や距離を求める例題にもなる．この例は生体内においても物理の理論が適用できることを実感させるのに非常に有力であるが，心臓，大動脈，大動脈弁の構造としくみについてあらかじめ解説する必要がある．

2．運動の法則

上述の例や他の簡単な例からニュートンの運動法則を帰納する．上の例1.2で急に走り出したり急に止まったりするには力がいることを指摘し，これを氷上で行なったらどうかなどを考えさせ，慣性の概念と法則を導入する．例1.1-1.4や他の運動で加速度が生じている時には力が働いていること，落下運動では引力が働いているとみなせることを認識させ，第2法則（質量×加速度＝力）を導入する．例1.3，例1.4で足が地面を押す力の反作用として体を押し上げる力を生じていること，下半身が上半身を押し上げる時は下半身も上半身から押されていることなどを指摘し，作用反作用の概念と法則（作用と反作用は大きさが等しく，逆向きである）を導入する．

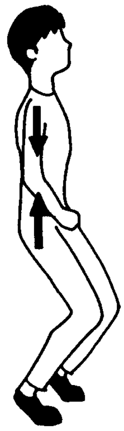


図 4． 立ち上がる運動　等加速度運動の例

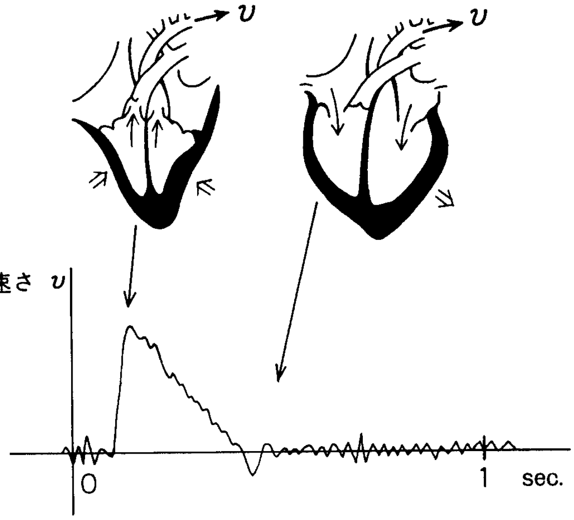
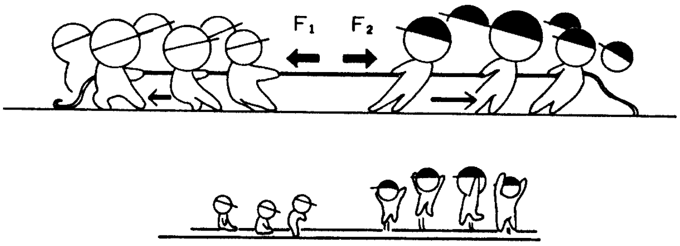


図 5． 大動脈血の運動　等加速度運動の例

第2法則，運動方程式の解法の具体例として，

QUIZ



① $F_1 < F_2$

② $F_1 = F_2$

③ $F_1 > F_2$

図 6． 綱引き　作用反作用の法則の例

いくつかの非生物的な例とともに次のものを用いる．

例 2.1　飛び込み　例 1.2 飛び込みの自由落下運動に関して，重力の働きであることを認識させる（図 1）．例えば，体重が 70 kg ならば力は 70 kg×9.8 m/s^2＝686 N となる．

例 2.2　スタートダッシュ　例 1.2 の短距離走のスタートダッシュにおいて体重を与えて加速時に足で地面を後ろに押す力を考える（図 2）．例えば，加速度 5 m/s^2，体重が 70 kg ならば力は 70 kg× 5 m/s^2＝350 N となる．

例 2.3　飛び上がる運動　例 1.3 の人が飛び上がる運動において体重を与えて足で地面を下や後ろに押す力を考える（図 3）．

例 2.4　立ち上がる運動　例 1.4 の立ち上がる運動について上半身の質量を与え，下半身が上半身を押す力を考える（図 4）．

例 2.5　大動脈血の運動　例 1.5 の大動脈血の運動の各期（収縮期と弛緩期）において，流れている血液のひとつの部分の質量を与え，その部分を前と後ろから押す力の合計を考える（図 5）．（血管壁からの摩擦力などを無視する．）

作用，反作用の例として次例を用いる．

例 2.6　綱引き　赤白 2 チームで綱引きを行い，赤が勝ったとして，赤チームが引く力と白チームが引く力のどちらが強かったかを考えさせる（図 6）．これらは作用と反作用だから等しいこと，足が地面を押す力の反作用として地面がチームを押す力に差があることを，氷上の綱引きなどを考えさせて理解させる．

3．様々な運動

放物運動の例として次のようなものを用いる．

例 3.1　幅跳び，高飛び，飛び込み　幅跳び，高飛び，飛び込み（図 1）などにおいて，運動方程式を解いて，各時刻の位置，速度，軌跡，初速度，到達距離，到達高度，滞空時間などを考えさせる．

このとき，体は変形したり回転したりするので，厳密には問題があるが，重心の概念を簡単に導入して重心をもって物体の位置とする立場をとる．重心のきちんとした導入は後にゆずる．質点の力学を論じた後，質点系や重心を導入するのが論理的のようにも思えるが，そうするとかなり進んだ段階まで身近な例が現れず，初学生にとっては入りにくいものになる．ここではそのような論理性を重視する立場はとらず，大ざっぱに「物体の位置」としておくのが初学生のスムーズな理解を助けるように思われる．

円運動，角速度，向心加速度［＝半径×（角速度）^{2}＝（速度）^{2}/半径］，向心力［＝質量×向心加速度］などの例として次のようなものを用いる．

例 3.2　徒競走のカーブ，カーブする鳥，振り回す運動，ハンマー投げ　徒競走でカーブを走るとき

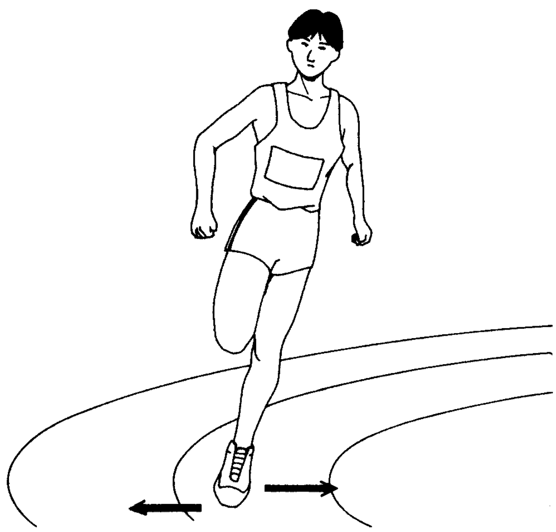


図 7． 徒競走のカーブ　円運動の向心力，遠心力の例

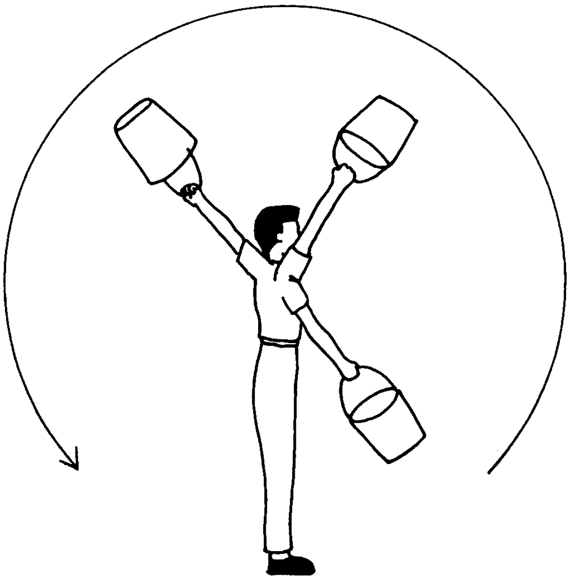


図８． 鉛直面内での円運動　向心力，遠心力の例

（図７），空中を飛ぶ鳥が水平面でカーブを切るとき，手に物を持って水平面内に円運動させるように振り回すときなどの速さ，角速度，向心力，向心加速度，傾く角度などを考察する．陸上競技のハンマー投げで投げる前のハンマーを振り回す運動はこのような円運動と見なすことが出来る．角速度，手にかかる力，ハンマーが手を離れるときの速度，その後の放物運動などを考察する．例えば体重 $m=70$ kg の選手が半径 $r=50$ m の円弧状のコースを $v=7$ m/s の速さで走るとき，足が地面を横に（外向きに）押す力の反作用が向心力として働き，向心加速度は $a=v^2/r=0.98$ m/s^2，向心力は $F=ma=68.6$ N，傾く角度は $\theta=\tan^{-1}(a/g)=\tan^{-1}0.1=5.7°$ となる（$g=9.8$ m/s^{2}は重力加速度）．

例 3.3　鉛直面内で振り回す運動，鉄棒の大車輪
手に物を持って鉛直面内に円運動させるように振り回すとき（図８），物が最高点にある時と最低点にある時の角速度，向心加速度，手にかかる張力＝向心力，途中で落ちないための最低点での角速度の下限値などを考察する．体操競技の鉄棒の大車輪の演技について，重心の円運動とみなして体が鉄棒の真上にある時と真下にある時の角速度，向心加速度，手にかかる張力＝向心力，真下での角速度の下限値などを考察する．

次に慣性系，加速度系，慣性力，遠心力などの概念を導入し，その例として次のようなものを用いる．

例 3.4　電車，エレベーター，ロケット内の慣性力
加速，減速する電車の中で人が受ける慣性力，加速，減速時のエレベーターの中に立っている人の足にかかる力，加速するロケットの中で体の各部にかかる力等を考察する．

例 3.5　徒競走のカーブ，カーブする鳥，振り回す運動，ハンマー投げの慣性力　例 3.2 の徒競走のカーブ（図７），水平面内でカーブする鳥，水平面内で物を振り回す運動，ハンマー投げのハンマーの運動などについて，回転系から見たときの遠心力，力のつりあい，運動を考察し，静止系からみたものと比較する．

例 3.6　鉛直面内で振り回す運動，鉄棒の大車輪
例 3.3 の物を鉛直面内で振り回す運動（図８）や鉄棒の大車輪について回転系から見たときの遠心力，力のつりあい，運動を考察し，静止系からみたものと比較する．

４．仕事とエネルギー

仕事（＝加えた力×力の方向に移動した距離），エネルギー（＝なし得る仕事）の概念を導入し，運動エネルギーの公式（運動エネルギー＝½×質量×（速度）^{2}），位置エネルギーの公式（たとえば，地表付近の一様重力場の位置エネルギー＝質量×重力加速度×高さ），力学的エネルギー保存の法則を導き，その例として次のようなものを用いる．

例 4.1　スタートダッシュ　例 1.2 の短距離走のスタートダッシュ時にする仕事（図２），等速運動時の運動エネルギーを考察する．例えば体重 70 kg のひとが加速度 $a=5$ m/s^{2}で $t=2$ 秒間加速するとすれば，走る距離は $x=\frac{1}{2}at^2=10$ m，力は $F=ma=350$ N だからその間にする仕事は $W=Fx=(350\text{ N})\times(10\text{ m})=3500$ J となる．また加速している間に速度は $v=at=10$ m/s になるから，等速運動の速度は 10 m/s で，運動エネルギーは $K=\frac{1}{2}mv^2=\frac{1}{2}(70\text{ kg})(10\text{ m/s})^2=3500$ J となり，エネルギー保存の法則が成り立つことを示す．

例 4.2　飛び込み，幅跳び，高飛び　例 1.1，例 3.1 の飛び込み（図１），幅跳び，高飛びなどについて

各時点での運動エネルギー，位置エネルギー，力学的エネルギーの保存あるいは損失などを考察する．

例 4.3　飛び上がる運動，立ち上がる運動　例 1.3 の飛び上がる運動（図３），例 1.4 の立ち上がる運動（図４）の各時点でする仕事，運動エネルギー，位置エネルギー，力学的エネルギーの保存を考察する．

例 4.4　鉛直面内で振り回す運動　例 3.3 の鉛直面内で物を振り回す運動（図８）について，各点での運動エネルギー，位置エネルギー，力学的エネルギーの保存を考察する．

5．力積と運動量

力積，運動量（＝質量×速度）の概念を導入し，運動量保存の法則を導き，その例として次のようなものを用いる．

例 5.1　飛び乗る　走ってきた人が台車に飛び乗るときの運動量の保存から前後の速度の関係を求める．

例 5.2　スケート　スケートをしている二人の人が近づいて来て手をつないで一緒に滑ったり一緒に滑っていてたがいに押し合って離れるときの運動量の保存を論ずる．ただし足での加速や制動は行わないものとする．

例 5.3　ブラウン運動　ブラウン運動おける溶媒分子とコロイド粒子の衝突（図９）の運動量の保存を論じる．このような現象は生体内でも広く見られ，物質の拡散において重要な役割を演じていることを指摘する．

例 5.4　粒子線　粒子線診断や治療における光子，中性子，重粒子などと体内の電子，核子，原子核の衝突（図 10）について，運動量の保存を論じる．

6．剛体

質点系，重心，剛体（＝変形しない物体），トルク（＝回転の軸から力の作用点までの距離×力の垂直成分）などの概念を導入し，その例として次のようなものを用いる．

例 6.1　腕のトルク　腕を伸ばして斜めに上げたとき，重力による肩回りのトルクの大きさ，トルクベクトルの方向を論じる．手に物を持ったり，手を曲げたり，あるいは重力だけでなく横方向に引く力があるときなど，様々な場合を考えさせ，トルクの概念を理解させる．

例 6.2　身体各部の重心　身体各部の質量と重心を与え，様々な姿勢での全体や部分の重心を考えさせる．

剛体のつりあいの条件（剛体に働く力の総和＝０，剛体に働くトルクの総和＝０）について論じ，その例として次のようなものを用いる．

例 6.3　下腕のつりあい　上腕を鉛直にし，下腕を水平に保つ場合の，肘関節で下腕が上腕から受ける力，上腕二頭筋が下腕を引く力，下腕に働く重力のつりあいを論じる（図 11）［５］．さらに物を持った場合，上腕，下腕の角度を変えた場合，

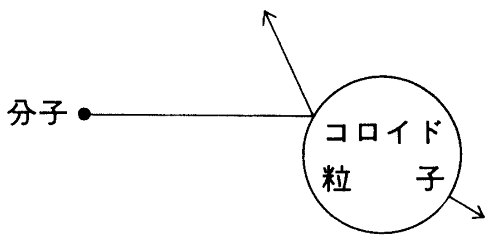


図 9． ブラウン運動における分子とコロイド粒子の衝突　運動量保存の法則の例

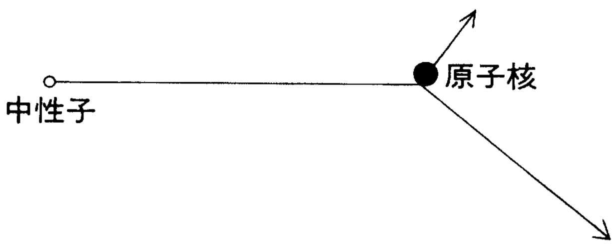


図 10． 中性子線照射における中性子と原子核の衝突　運動量保存の法則の例

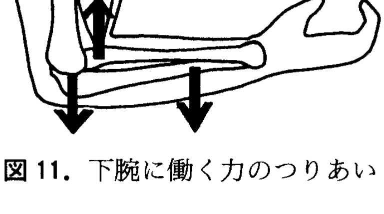


図 11． 下腕に働く力のつりあい

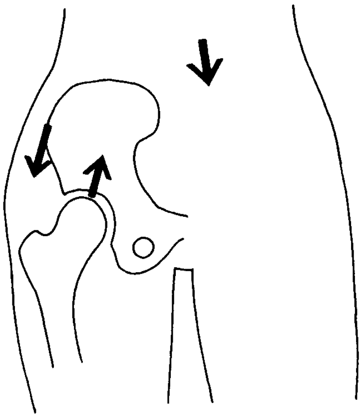


図 12. 股関節の荷重　力のつりあいの例

横方向に引く力がある場合などを考えると様々な応用ができる．

例 6.4　股関節の荷重　片足立ちするとき，支えている脚をのぞいた部分に働く重力，外転筋からの力，股関節での大腿骨頭からの力のつりあいを考え，それぞれの作用点の位置と骨頭荷重の関係を論じる（図 12）［5］．大腿骨，骨盤の形状によって，骨頭荷重が過大となり治療が必要になる場合がある．

例 6.5　脊柱のつりあい　上体を前に倒した姿勢でものを持ち上げるとき，上体と持ち上げるものに働く重力，腰からの力，腰からのトルクのつりあいを考え，腰，脊柱にかかる荷重を論じる［5］．

例 6.6　顎　歯で物を嚙むとき，物から下顎の歯への反作用，各筋肉から下顎に働く力，顎の関節から下顎に働く力のつりあいから嚙む力，顎関節にかかる力の大きさや方向を論じる．

慣性モーメント（＝質量×(回転軸からの距離)^2 の総和)，剛体の回転の運動方程式(慣性モーメント×角加速度＝トルク）の例として次のものを用いる．

例 6.7　腕の運動　腕を伸ばした状態の慣性モーメントを概算し，振り上げたり振り下ろしたり腕を上げる角度，角加速度と肩にかかるトルクの関係を論じる．手に物を持って上げ下げするときなど様々なオプションを考えることができる．伸ばした腕を振って物を打ったり投げたりするときのトルクを論じる．また同様にして下腕を振るとき肘にかかるトルク，足を振ったり，足で物を蹴ったりするときのトルクを考えることができる．応用としてバレーボールのサーブ，ソフトボールの投球等で肩にかかるトルク，サッカーでボールを蹴るときのトルク等を考える．

例 6.8　頭の回転　頭の鉛直軸周りの慣性モーメントを概算し，頭を鉛直軸を中心に回転させ，左右に向けたり戻したりするとき（図 13）これに関わる筋肉の働きによって生じるトルクを論じる．

図 13. 頭部の回転運動　慣性モーメント，回転の運動方程式の例

回転の運動エネルギー（≒½×慣性モーメント×（角速度)^2）の応用として次の例を用いる．

例 6.9　倒れる　立っている人の慣性モーメントを概算し，その形のまま倒れて地面と衝突するときの頭部の速さをエネルギー保存の法則（回転の運動エネルギー＋並進運動エネルギー＋重心の位置エネルギー＝一定）を用いて算出し，大人の場合，子供の場合などを比較する．

例 6.10　大車輪　体操競技の鉄棒の大車輪の演技において，人が鉄棒につかまり腕と体を伸ばした状態で回転するときの慣性モーメントを概算し，運動エネルギーの保存から最高点，最低点を通過するときの角速度，手にかかる張力等を論じる．

角運動量(＝慣性モーメント×角速度)，角運動量保存の法則の例として次のものを用いる．

例 6.11　スケートのスピン　フィギュアスケートのスピンにおいて，はじめ手を横に伸ばした状態で回転していて手を縮めて体に引き寄せるとき，角運動量の保存から回転速度の変化，回転の運動

エネルギーの変化を求める．手を横に伸ばした状態では慣性モーメントが大きく，手を縮めると慣性モーメントが減少するので角速度が増加する．選手は遠心力に逆らって手を縮めるために内部のエネルギーを使って仕事をするので回転の運動エネルギーは増加する．

回転の運動方程式の応用として実体振子の運動を解き，その例として次のものを用いる．

例 6.12　歩行　歩行の各一歩の脚の運動を実体振子の半周期とみなし，脚の慣性モーメントを概算し，半周期を算出し，自然な歩行の一歩の所要時間と比べる．支点の上下動，脚の伸縮などがあるので，大ざっぱな近似ではあるがほぼ現実に近い値が得られる．また，歩行前の手の振りについて，腕の慣性モーメントを概算し，半周期を算出し，自然な歩行の一歩の所要時間と比べる．これは脚の振子よりやや小さいが近似的には近い値と言える．これとかけ離れた周期で歩いたり，手を振ったりすれば，無理な運動となり，余分なエネルギーを消費することになる．両脚の運動による鉛直軸周りの角運動量と両腕の運動による鉛直軸周りの角運動量との双補的な関係にも触れ，このような手を振る歩行が自然でエネルギーの損失が少ない歩行であることを指摘する．

7．弾性体

応力，ひずみ，弾性，塑性，破壊，弾性率，極限応力，破壊応力等の例として次のようなものを用いる．

例 7.1　身体各部の弾性　皮膚，内臓，筋肉，腱，靭帯，骨，軟骨等の弾性率，極限応力，破壊応力の文献値を用い，加えた力と変形の関係，どのくらいの力で破壊されるか，そのときどのくらい変形するか等を論じる．筋肉の応力，長さが，脳神経系によって制御される場合は単純な応力ひずみ関係だけでは記述できず，もっと詳しい扱いが必要であることを指摘する．

曲げの力学的な意味を考察し，内部トルク（＝ヤング率×断面２次モーメント/曲げの曲率半径）の公式を導き，その例として次のようなものを用いる．

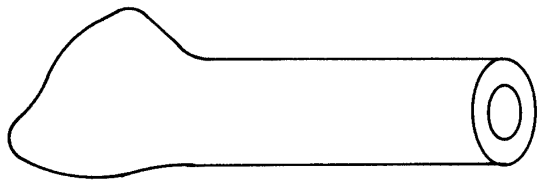


図 14. 長骨の構造　曲げに強い筒状構造の例

例 7.2　骨の曲げトルク　長骨は外周の緻密な構造の中央に骨髄腔があり，中空の筒状になっている(図 14)．これに外部から曲げトルクを加えたときの曲げの曲率半径を求める．仮に骨に骨髄腔が無く中まで詰まった棒状だとし，同じ量の材質から出来ているとすれば，筒状の場合より細いが，断面積は同じ棒になる．この棒に外部から上と同じ曲げトルクを加えたときの曲げの曲率半径を求め，上の結果と比べる．前者の方が曲げにくい．すなわち，自然は軽くて丈夫な構造を採用していると言える．

例 7.3　曲げによる骨折　極限応力まで応力ひずみの比例関係が成り立つものとして近似し，かつ，極限応力に達する点と破壊点は近いものと仮定して（この近似と仮定は骨などの材質ではほぼ成り立つ．）骨の折れる条件を求める．折れる曲げトルクは（極限応力）×（断面２次モーメント）/（骨の半径）で与えられる．前の例と同様，同じ断面積の棒と比較すると骨のように筒状になっている方が折れにくいことがわかる．

8．流体

連続の式（密度×流速×流管の断面積＝流線に沿って一定）の例として次のようなものを用いる．

例 8.1　連続の式　血管の正常部分と直列に接続した狭窄部の血流の速度の比較，動脈，静脈と分岐した毛細血管の速度の比較，注射器をおす速度と針の中の速度の比較など．血液のような非圧縮流体では流速は断面積に反比例することを指摘する．

完全流体（粘性のない流体）のベルヌーイの定理（圧力＋½×密度×（流速）^{2}＋密度×重力加速度×高さ＝流線に沿って一定）の例として次のよ

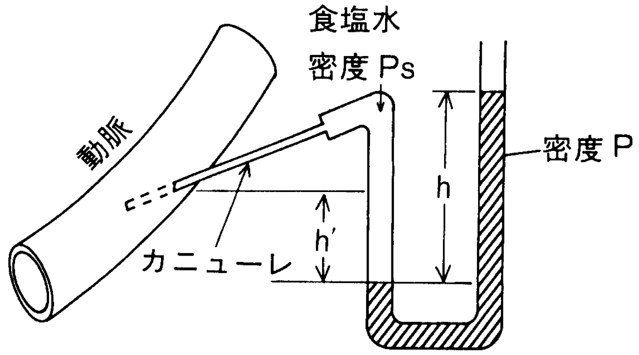


図 15. カニュレレーションによる血圧の測定
ベルヌーイの定理の例

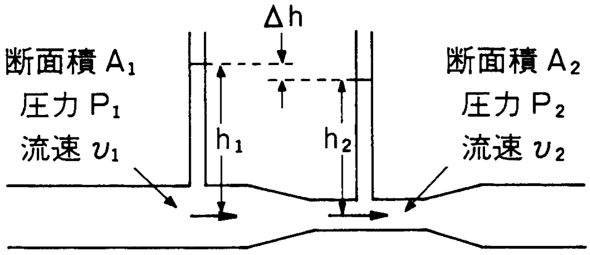


図 16. 絞り流量計　ベルヌーイの定理の例

うなものを用いる．

例 8.2　カニュレーション　血管内に針を挿入して，これに接続した開管圧力計で圧力を測定するときの，圧力計の表示液面の高さと血圧の関係を静止流体に対するベルヌーイの定理を適用して考察する（図 15）．

例 8.3　血圧　起立時，静臥時の頭，心臓，足の血圧の比較．加速するエレベーター，ロケット内での身体各部の血圧の比較．流速，粘性，拍動等は無視して平均としておおざっぱな比較をする．静臥時の頭，心臓，足の血圧はほぼ等しいが，起立時は頭の血圧は低く，足の血圧は高くなること，加速するエレベーターやロケットの中に立っている時はさらに差が大きくなること，起立時，血圧の低下や上昇を補償する様々な機構があることを指摘する．

例 8.4　点滴　血液は比較的粘性の高い流体であるが静止時はベルヌーイの定理を適用することができる．これを用いて点滴が逆流しない高さと静脈血圧の関係を求める．例えば静脈血圧を 8 torr とし，血液の速度を無視すれば高さは約 10 cm になる．

例 8.5　絞り流量計　絞り流量計は直列連結で太さの異なる部分に目的の流体を通し，それぞれの部分の圧力の差を測定し，ベルヌーイの定理を用いて流速を求めることのできる装置である（図 16）．体外に導いた血流の流量を測定するため等に利用する．具体的な場合に適用して，この装置の原理を通してベルヌーイの定理の意味を学ぶ．

粘性流体のポアズイユの法則（水平な一様円管内を流れる粘性流体の層流の流量は $8\pi\times$（管の半径）$^4\times$圧力勾配/粘性率）の例として次のようなものを用いる．

例 8.6　血管内の血流　血管内の血流にポアズイユの法則を適用し圧力勾配と流量の関係，血管の狭窄による流量の減少などについて論じる．

例 8.7　注射器の流量　注射器の針の中の流れについてポアズイユの法則を適用し，おす力と流量の関係を論じる．

乱流，レイノルズ数（＝密度×平均流速×直径/粘性率，次元がない．これが 3000 より大きければ乱流，2000 より小さければ層流になる．）の例として次のようなものを用いる．

例 8.8　血管内血流のレイノルズ数　レイノルズ数の意味，次元のない量の重要性を指摘し，血管内の血流の流速，密度，粘性率，血管の半径を与え，レイノルズ数を計算して層流になるか乱流になるかを考察させる．

例 8.9　血管狭窄部での流れの剥離　一様な管の一部に狭窄部（細くなっているところ）があると連続の式によれば流速の断面積に反比例して速くなる．流れが流線流になるためには狭窄部を通過した流体はまたもとの遅い流速に戻らなくてはならない．しかし，狭窄部で速くなった流体は慣性のためすぐには減速せず管の中心部を高速で進み，管壁付近の流体は取り残され，逆流や渦が発生し，流れは乱流になる．この現象を流れの剥離という（図 17）．流れの剥離が起こると乱流になるため，流量は減少し，下流での圧力はいちぢるしく低下する．これを流れの剥離による圧力損失という．血管内で脂質の沈着等により狭窄が発生すると，流れの剥離が起こり血流が遅くなるので，血栓，脂質沈着，平滑筋の増殖が起こり，血管狭窄が進

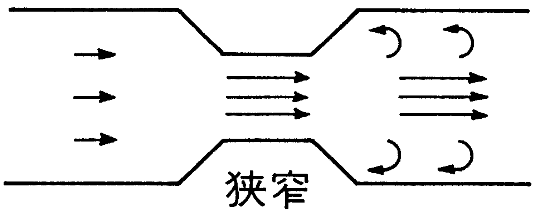


図 17. 流れの剥離　連続の式，層流，乱流の例

み，悪循環に陥ることが多い．このような現象は血管の分岐部や湾曲部で発生しやすい．これは複雑な現象なので定性的な扱いになるが，流体の基本的な性質を総合的に適用する必要があり，応用上も重要な意味を持っており，教育的な題材である．

流動抵抗（＝圧力降下/流量）を定義し，直列，並列接続の等価流動抵抗の公式（直列：等価抵抗＝各抵抗の総和，並列：等価抵抗＝各抵抗の逆数の総和の逆数）を導出し，その例として次のようなものを用いる．

例 8.10　血管床の流動抵抗　肝臓，門脈，内臓からなる流路系について，各部の抵抗と動静脈圧差から各部の流量と門脈圧を算出する（図 18）．また一部抵抗に異常がある場合の流量や門脈圧の変化を考察する．

ラプラスの法則の例として次のようなものを用いる．

例 8.11　血管の張力　血管を円筒とみなし，その軸を含む平面で分けた片側の半円筒に対する血管壁の張力，内圧による力，外圧による力のつりあいから血管内外の圧力差と壁の張力の関係を考察する（図 19）．

例 8.12　肺胞の張力　肺胞をひとつの球殻（またはその一部）とみなし，その中心を含む平面で分けた片側の半球に対する肺胞壁の張力，内圧による力，外圧による力のつりあいから肺胞内外の圧力差と壁の張力の関係を考察する（図 20）．

以上，生物関連の力学基礎教育の題材を体系的にまとめてみた．今後，熱学，電磁気学，波動，近代物理学などの分野についてもまとめていきたいと考えている．我々はこれらの例題を実際の教

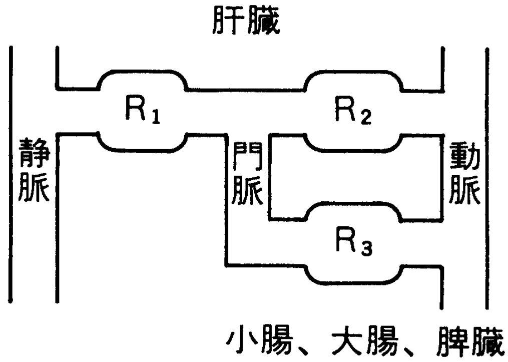


図 18. 血管床の流動抵抗

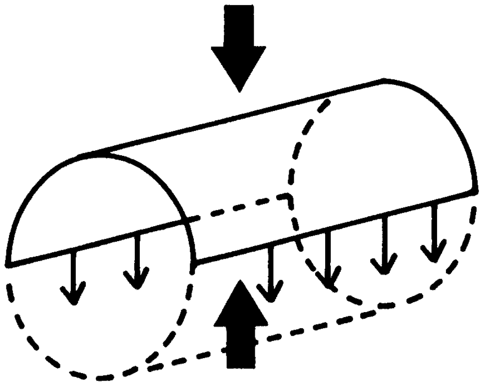


図 19. 血管内外の圧力差　ラプラスの法則の例

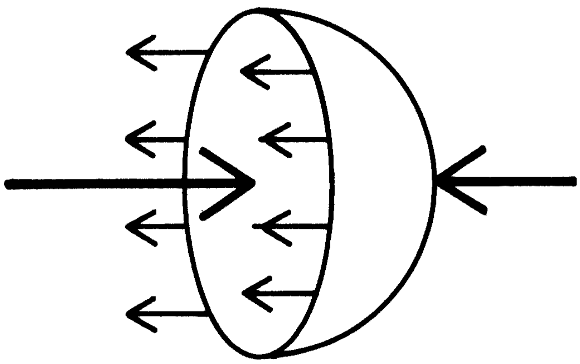


図 20. 肺胞内外の圧力差　ラプラスの法則の例

育の場で用い，検討を加え吟味してきた．その結果，これらは十分平易で，初学生の理解に耐えるものであり，かつ，原理の把握に有効であることが分かった．しかし，対象が医学生であっても，物理の全体像の把握を目的とする基礎教育にあっては，生物的題材だけでは不十分である．これらは，従来のような非生物的な題材と適宜配置して用いるべきものである．我々はこのような生物的な題材をバランスよく取り入れた体系を単に医学

や生命科学に進む学生のための基礎教育としてだけではなく，工学系や文科系も含む一般の学生，あるいは専門の未分化の初等中等教育の生徒も対象として提案したい．それが物理学本来の性格にもマッチしたものであり，今日と将来の学生，生徒，あるいは社会のニーズに答えるものだと考えるからである．

この研究は平成 8-10 年度文部省科学研究費補助金の交付を受けて行われている研究「生命科学教材による基礎物理教育体系の構築」（研究代表者：赤間啓一，研究課題番号：08680206）の一環として行われたものである．

この研究を進めるに当たり，様々な知識を提供し，討論に参加して下さった林秀生先生，野村正彦先生，二ノ宮節夫先生，木下清一郎先生，上原政治先生，菅原隆先生，藤牧利昭先生，山崎芳仁先生，斎藤義弘先生，ならびに埼玉医科大学生理学教室，整形外科学教室の方々に心から感謝の意を表します．

文　献

1) 埼玉医科大学物理教室編，物理学 1，2，3 講義ノート，埼玉：埼玉医科大学物理学教室，1997.
埼玉医科大学物理教室編，医学系学生のための一般物理学実験，埼玉：埼玉医科大学物理学教室，1997.
2) 例えば，
F. M. H. Villars, G. B. Beneder, Physics, Massachusetts:Addison-Wesley Publishing Company, 1974.
J. W. Kane, M. M. Sternheim, Physics, New York:John Wiley and Sons, 1978.
赤野松太郎，鮎川武二，藤城敏幸，村田浩，医歯系の物理学，東京：東京教学社，1987.
3) 赤羽　明，赤間啓一，勝浦一雄，林　昌樹．医学・生命科学系の物理教育．埼玉医科大学進学課程紀要 6 号，(1995)，p.1-15.
4) 鴨谷亮一，望月政司，金井寛，循環系の力学と計測，東京：コロナ社，1971.
5) 島津晃，浅田莞爾，バイオメカニクスよりみた整形外科，東京：金原出版株式会社，1988.