

**第8回 講義内容**

2022/11/14

**配布物**

- 08\_Physics\_contents.pdf                      このファイル                      Google classroom, web  
「エネルギー保存則からみたダイエット」、講義前半のまとめ                      が付いています。
- 08\_Physics\_Viewgraph.pdf                      スライド                      Google classroom, web  
スライドファイルは、当日朝に配布します。

**講義内容（予定）**

- §4.1 温度  
物質の三態，圧力鍋，融解熱・気化熱，過冷却現象，熱の伝わり方
- §4.2 気体の法則・熱力学の法則  
飽和水蒸気量，冷蔵庫のしくみ
- §4.3 熱機関  
永久機関は可能か

**本日の復習課題例**

こんなことを観たり，調べたり，考えてもらったら面白いかな，という程度のおまけ。

- 鍋の素材と用途について確認しよう。
- 熱力学の第0法則とは？

**次回の予習項目**

こんなことを調べてもらったら面白いかな，という程度の課題。

- これまで考えられてきた永久機関をいろいろ調べ，どこでエネルギーが失われるのか考えてみよう。
- 音の3要素とは？

**お知らせ**

- 12月18日（日）大阪市立科学館×大阪市中央公会堂のコラボ企画『100年目のアインシュタイン』  
今年はアインシュタインが来日して100年となり，アインシュタインが講演した大阪中央公会堂で真貝の講演「相対論と量子論：アインシュタインの成功と失敗」と題した話と，室内楽を聴く企画があります。  
要申し込み，有料です。  
<https://osaka-chuokokaido.jp/news/2022/11/11/99.html>
- 11月18日（金）は，しし座流星群の極大日ですが，ことしは極大時間が昼なのであまり期待できないでしょう。

# 資料 D ダイエットとエネルギー保存則 (大学の物理教育, 2009)

## 講義室

### エネルギー保存則からみたダイエット



室谷 心  
呉 泰雄  
水谷 雅志

松本大学総合経営学部  
松本大学人間健康学部  
早稲田大学理工総研

#### 1. はじめに

物理法則は現実世界の法則であり人間も含めた世の中全てに対して成り立つ基本法則であるといふことの実例として、エネルギーの観点で見たい人の話を整理してみた。一般の人が興味を引きやすい「ダイエット」や「メタボ」をキーワードとし、食事や代謝といった事柄をエネルギーの観点から整理したもので、大学の一般教養科目や高校への前授業などでも、学生の注目を集めることができると期待している。ここで扱う話題は、通常、栄養学の分野で扱われる内容であるが、物理的な観点で話を整理すれば、物理の教材として十分使えらることを考える。

#### 2. 2 kg のパフェ

つきはある喫茶店で耳にした高校生カップルの会話である。  
少女が注文したパフェを前にして  
少年「それでも、2 kg くらい体重増えるんでねえ？」  
少女「エー！ そうかな？ いやだなー」

これはアメリカの語ではなく日本のごく普通の喫茶店での会話であり、とうてい2 kg はなさそうに普通サイズのパフェを前にした会話である。理科教育関係者としては、エネルギー保存則や質量保存則はどこへ行ってしまったのかと嘆きたくなる場面である。

実はこの会話は、著者の1人が高校時代に同級生大勢で喫茶店に行った際の会話であった。この2人は理系クラスの同級生であり、彼女に聞いてみると物理で習ったエネルギー保存則も化学で習った質量保存則も知っているが、体内で反応して

増えるかと思っただけで、確かに人間の体はエネルギーも物質も出入りする開放系であり、エネルギーや質量の保存則を単純に適用できるかどうかは境界条件に注意が必要である。

#### 3. 供給エネルギー

炭水化物などの栄養素を食事として摂り、体内で酸素と反応(燃焼)させてエネルギーを取り出し、できた水と二酸化炭素を体外へ排出するというのが、人体のエネルギー利用の基本的な流れである。最近、ファミリーレストランや大学の食堂でメニューを見ると、料理や飲み物のカロリーが書いてあることが多い。料理のエネルギーを正確に測るには、ボンカロリメーターといわれる燃焼型熱量計が使われる。しかし消化吸収の過程で、実際に体内に取り込まれるのがどの程度であるのかは気になるところである。

栄養関係の文献によれば、メニューなどに表示されている熱量は食品成分表や栄養表示基準にあるエネルギー換算係数(単位質量あたりのエネルギー)を用いた計算値である<sup>1)</sup>。これらは基本的には各食品に含まれる炭水化物や脂質、タンパク質等の割合と、アトウォーターのエネルギー換算係数から求められている。

我々にとって耳慣れないアトウォーターのエネルギー換算係数というのは、栄養素に関与してそれ自身の燃焼時の熱量を体内への吸収率によって補正した値である。たとえば三大栄養素である炭水化物、たんぱく質、脂質についてよく耳にする4.4, 9 という数字は、表1に示したように純粋な燃焼エネルギーを平均的な吸収率によって補正した値である。燃焼によってすべてが水と二酸化炭

表1 アトウォーターのエネルギー換算係数<sup>1)</sup>

成分	物理的燃焼熱/(kcal/g)	消化吸収率/%	排泄エネルギー/(kcal/g)	換算熱/(kcal/g)	換算熱/(MJ/kg)
炭水化物	4.1	97	0	4	17
タンパク質	5.7	92	1.25	4	17
脂質	9.4	95	0	9	38
エタノール	7.1	100	0	7	30

エタノールは高田和子<sup>2)</sup> および「理科年表<sup>3)</sup>」からデータを追加した。

素になる炭水化物と脂質に関しては、補正は吸収率だけである。一方タンパク質の場合には、含まれている窒素は尿素として体外に排出される。このため、タンパク質については尿素として排泄される分のエネルギーを差し引いた補正值となっている。

つまり、メニューに書いてあるカロリー表示は料理そのものの燃焼エネルギーではなく、実際に体内に吸収される体内で使われるはずのエネルギーを表している。アトウォーターの換算係数に含まれている吸収率は平均値であり実際の吸収率は食品によって異なる。白米のような重要な品目に関しては、その食品独自の換算係数が調べられている。三大栄養素ではないが、参考のため付記したアルコールの場合、100% 吸収されて換算熱量は7とされている。

#### 4. エネルギー消費

体内に入った三大栄養素はいずれも酸素と結合(燃焼)しエネルギーを放出する。この過程は、生体が栄養素に含まれる化学エネルギーを熱や仕事に変えるという意味で、異化作用とよばれる。生物が静かに寝ている状態での単位時間あたりのエネルギー消費率(異化作用率)を基礎代謝(基礎異化作用率)とよぶ。ネズミからゾウまでさまざまなサイズの生物について、基礎代謝率  $\left(\frac{dE}{dt}\right)$  は質量  $M$  の  $3/4$  乗に比例するというスケール則、Kleiberの法則  $\left(\frac{dE}{dt}\right) = CM^{3/4}$  が知られている<sup>4,5)</sup>。ここで定数  $C$  は、ペネディック-ビラースでは  $C=90 \text{ kcal}/(\text{日} \cdot (\text{kg})^{3/4}) = 4.4 \text{ W}/(\text{kg})^{3/4}$  であり、本川によれば  $C=4.1 \text{ W}/(\text{kg})^{3/4}$  である<sup>6)</sup>。つまり、ペネディック-ビラースの値

#### 5. 余ったエネルギー

保存則を適用する際に気になるのが、過剰に摂り余ったエネルギーの行方である。前節で述べ

を例えば体重65 kg、本川の値を使えば70 kgの人の基礎代謝は約100 Wで白熱電灯1つ分になり、一日あたりに直せば約2100 kcal/日となる。この基礎代謝の、身体部位ごとの消費割合は表2のようになっている。表2はペネディック-ビラース<sup>4)</sup>と樋口満<sup>6)</sup>の数値の比較である。出版年が20年以上違う文献であり、エネルギーを消費する褐色脂肪の発見などの違いが見られるが、脳の占める割合(約20%)など基本的な部分に大きな違いはない。

表2 基礎代謝の部位ごとの消費割合

体重65 kgの男性 <sup>4)</sup> (%)	体重70 kgの男性 <sup>6)</sup> (%)	
心臓	7	
腎臓	10	
肝臓、脾臓	27	
脳	19	
骨格筋	18	
その他	19	
	脂肪	4

基礎代謝は生命を維持するための必要最低限な単位時間あたりのエネルギーと考えることができ、運動時には、基礎代謝に加えて運動に必要なエネルギーを取り出すための異化作用が行われる。運動などでエネルギーが力学的な仕事として使われる際には、異化された化学エネルギーの10-20%だけが力学的の仕事に使われ、残り80%以上は熱になる<sup>4)</sup>。

表4 エネルギー的にみたダイエット、人間と自動車の比較

	人間	自動車
エネルギーは保存する	取り入れたエネルギーは使うか貯めるしか ない。捨てられない。	燃料漏れなし。
ダイエット法 = エネルギーを無駄にしない方法	余ったエネルギーは体に蓄積される。 筋力(筋肉)をつける 基礎代謝レベルを上げる	使わない燃料はタンクに残っている。 燃費の悪い大排気量エンジンに換わる
連続運転を続けるために	ハラマシなど微量栄養素やミネラルを取る ビタミンなどの微量栄養素やミネラルを ピタリと取る	アイドリングをあげる 質のよい混合燃料をつかう いろいろな部品のメンテナンス

ネルギーとして使ってしまう他に体外に排出されるものも、また筋肉を使うと作られる疲労なものになる乳酸もあるが、八田によれば乳酸も最終的には燃焼される中間生成物であり、排泄されるものではない<sup>10)</sup>。

アトウォーターの換算係数を使うという意味では消化管の中は体内ではなく、エネルギーは胃や腸で吸収されて初めて体内に入る。大便は栄養素の廃棄物である。胃や小腸、大腸といった消化器は吸収機能を持つが排泄機能はなく、消化器管内で体内から外へ出されるものは胃液や胆汁といった消化液であり老廃物ではない。本論文の文脈では一番の老廃物は栄養素の燃焼による二酸化炭素と水である<sup>10)</sup>。また、栄養素を燃焼させて使ってしまう場合にも、第4節で述べたように筋肉で力学的な仕事に利用されるのはたかだか20%程度であり、大部分は熱になる。つまり、発熱することなしに仕事として消費してしまうことはできないはずである。

7. まとめ

複雑な生化学反応システムを持つ人体に対して、全体をみればエネルギー保存則がきちんと成り立っており、摂取したエネルギーは決してなくなり、筋肉で消費される場合には、外への力学的な仕事になるのは消費エネルギーの10%~20%程度であり、残りは熱になる。また、蓄積される場

たように、アトウォーターの換算係数によって、表1のエネルギーは体内に吸収されて体内で消費されるはずのエネルギーだけでなく、大便に含まれる「吸収できなかった」エネルギーはすでに除かれた。また、現在知られている生体の機能には、三大栄養素を体外に排泄する機構は基本的には存在しない。もし糖分やタンパク質が尿に出れば糖尿やタンパク尿であり成人病検査に引っかかることになる。脂質も腎臓で濾過できず尿に出ることはない。したがって、食べた食品に表示されていたエネルギーは体内で消費されるか蓄積されるかのいずれかしかない。

6. ダイエットについて

前節でみたように、人体はエネルギー漏れのない良いシステムであり、体内に入れたエネルギーを蓄積したいためには使わなければならない。以上の考察を元に本論文のタイトルにある「ダイエット」を考えてみると、自動車と比較して表4のようにまとめることができる。インターネッとや新聞などの広告を見ていると、「老廃物や毒素を体外へ排泄」というたぐいの言葉がよく見られるが、ここまで議論してきたような視点で見ると、「老廃物」も「排泄」も怪しいキャッチコピーである。たしかに悪玉コレステロールや古いヘモグロビンやミトコンドリア、老化した筋肉など体外に出してしまいたい物質はあるが、これらも栄養素なので排泄機構はなくエ

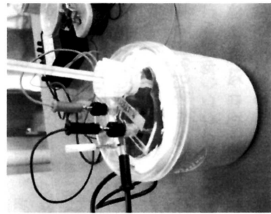


図1 熱の仕事当量測定実験

表3 Diaz *et al.* の実験<sup>7)</sup> と熱の仕事当量の比較

実験内容	Diaz <i>et al.</i> <sup>7)</sup>	熱の仕事当量の比較 (図1)
エネルギーの変換	食事をして生活をする 食物 → エネルギー	電気で水を加熱する 電気エネルギー → 熱 (内部エネルギー)
求める換算定数	食物や人体のエネルギー当量	熱の仕事当量
エネルギーの保存	全エネルギー = 栄養分が含むエネルギー + 消費エネルギーは保存する 栄養分は排泄されない	全エネルギー = 電気エネルギー + 内部エネルギーは保存する 室温は十分断熱的で熱の漏れはない

原田直子教授、中島節子助手をはじめ松本大学人間健康学部の多くのスタッフに最近のデータについていろいろ教えていただいた。第25回物理教育研究会での多くの有益な議論に感謝したい。器具に関しては信州大学実食島野教授にお世話になった。

参考文献および注

- 1) 「食品の熱量 (エネルギー) について」Japan Food Research Laboratories News 35, Jul. (2003).
- 2) 高田和子「摂取したエネルギーの体内での吸収と利用」体力科学 56 (2007) 287.
- 3) 東京大学「理研年表平成21年」丸善 (2008).

## 資料 E

### 講義の要点 (前半)

本講義を振り返り、理解しておいて欲しいことを問題形式でまとめておきます。

#### 第 2 章 力学 — つりあいと運動

##### 速度, 加速度

- 物理において、加速度が重要な理由は何か。加速度運動と等速運動の例を挙げよ。
- 放物運動は等加速度運動（上下方向）と等速度運動（水平方向）の組み合わせであることを図を用いて説明せよ。

##### 力のつりあい, 重心

- 摩擦力がなかったら、世の中どうなるか。
- ゴムひもでバンジージャンプを行うとき、どのような上下運動になるか。グラフを用いて説明せよ。
- 妊婦の女性が、そっくり返って立つ理由は何か。綱渡りの人は、なぜ棒を持つのか。

##### ニュートンの運動法則

- (a) 慣性の法則, (b) 運動方程式, (c) 作用反作用の法則。それぞれを例を挙げて説明せよ。
- 運動方程式で力をゼロとすれば加速度はゼロになる。つまり、慣性の法則を再現するが、ニュートンの運動法則として、慣性の法則が独立している理由は何か。
- 月へ行くロケットの打ち上げは多段式の大きなものだが、月から帰還するときは、燃料をほとんど必要としない。その理由を説明せよ。

##### 万有引力の法則と重力による運動

- 万有引力の法則を説明せよ。月が地球に落下してこない理由は何か。
- ボールを斜めに投げ上げると放物線を描くが、これは理想的な場合である。実際には空気抵抗があり、速度に応じてボールは抵抗力を受ける。実際のボールの軌跡は放物線に比べてどのようなカーブになるか説明せよ。

##### 保存則という考え方

- (a) 力学的エネルギー保存則, (b) 運動量保存則, (c) 角運動量保存則。それぞれを例を挙げて説明せよ。

##### 回転する運動

- 遠心力は「見かけの力」と言われるが、どういうことか。上下に回転するバケツの水の運動を 2 つの立場で説明せよ。
- 潮の干満は月による重力が影響しているが、1 日に 2 回干満があるのはなぜか。
- フィギュアスケートのスピンを速くするには、どのような工夫をすればよいか。
- 静止衛星とは何か。
- 台風（低気圧）の風の方向をコリオリの力を使って説明せよ。

#### 第 3 章 流体 — 連続体の運動

##### 流体の性質

- 流体とは何か。流体の性質（圧力、表面張力、浮力など）を 1 つあげ、具体的に説明せよ。
- 物質の 3 態を図を用いて説明せよ。
- 浮力のしくみを説明せよ。
- 熱気球が飛ぶ原理を説明せよ。

##### 動く流体

- 空気抵抗、水流の抵抗に対する身の回りで見られる工夫を挙げよ。
- 飛行機が飛ぶ原理を説明せよ。

**第 4 章 熱と気体 — 熱エネルギー**温度は何で決まるのか

- 温度とは何か. 何故, 絶対零度が存在するのか. 高温に限界はあるか.
- 放射冷却とは何か.

気体の法則, ジュールの実験と熱力学の第 1 法則

- 気圧と沸点の関係を説明せよ. また, 「圧力なべ」はどういう原理か説明せよ.
- 気圧と飽和水蒸気圧の関係を説明せよ. また, 霧や雲ができるしくみを説明せよ.

熱機関, 永久機関は可能か

- 熱機関とは何か説明せよ. また, 冷蔵庫やエアコンのように温度を下げる機関の原理を説明せよ.
- 永久機関とは何か説明せよ. また, 永久機関ができない理由を説明せよ.
- 閉め切った室内で冷蔵庫を開け放しにした. 1 時間後, 部屋の温度はどうなるか. 理由をつけて説明せよ.