

物理量と単位の具体的指導法

北海道小樽工業高等学校 菅原 陽

物理量と単位について、幼いときからの学習体験をもとに物理を学ぶ上の基礎を確認していく。また物理の問題を解くためには単位の記述を含むイメージ図が重要であると同時に、自他にわかりやすい説明をするためにも、物理量や物理法則の言語的理解が必要である。そのことを生徒に説明し実施する授業内容および試験問題と配点例も示す。

キーワード 物理量 連続量 分離量（離散量） 足し算 引き算 単位 あたりの量 組立単位 体積比熱

1. 物理量と単位・・ 単位あたりの量

a 「量」について

私たちは量について算数の授業を通じて学んできた。授業では改めて物理量を意識して、多くの生徒に発問しながら生徒の答を板書しながら進めていく。

量には**分離量（離散量）**と**連続量**がある。例を挙げてみよう。**分離量**：ミカンが1個バナナが1本リンゴが3個鉛筆が2本・・・・人、枚、匹、頭、台と数多くある。分離量はびたりとした値である。**連続量**：3メートルのひも、100グラムの水、100メートルを15.6秒で走る・・・・mm、kg、分、mg、km、日、トン、等。**連続量**はびたりとしていない。また、一つの物体は様々な**物理量**を持つ。例えば1円玉はびたりと1円だが直径は1.998 cm、重さは1.001 gかもしれない。連続量は目的に合った精度の測定器で計測して確定する。

b 単位あたりの量・・ A/B や A/C の割り算

長さは小学校2年生で単位（ミリメートル(mm)、センチメートル(cm)及びメートル(m)を学習し、割り算は小学校3年生から学習が始まる。割り算は次のような操作であり、2種類の意味があり区別できる。

[個数C] = [全体量A] ÷ [基準量B] ・・・・①(包含除)

[基準量B] = [全体量A] ÷ [個数C] ・・・・②(等分除)

平均を求めるときは②、「1あたりの量」を求めるときは①に相当する。単位を意識しないと意味をつかめない。

様々な例を発問し考えてみよう。分離量あたりの分離量を「分/分」、分離量あたりの連続量を「連/分」とし具体例を考えてみる。「分/分」：一人あたりミカン2個→ミカン2(個/人)、また、(本/台)の単位から「タイヤは車1台あたり4本ある」のような例を考えさせるのはよい頭の体操である。

生徒には次の単位の具体例を挙げるよう質問する。

「連/分」：(g/人)、(kg/人)、(g/皿)・・・等

「分/連」：(本/m)、(個/g)、(人/分)・・・等

「連/連」：(g/m)、(トン/秒)、(m/秒)・・・等

c たし算：単位が同じならば足し算は可能か？

この問いを日常生活の中で考えると「ミカン1個とイチゴ2個を足すと3個になる」が「ミカン2個とイチゴ1個で3個」は同じだろうか？「鉛筆1本と電信柱1本をたすと2本」に意味があるだろうか。身長160cmと170cmをたすことはできるが、実際サーカスでは実演できる人もいるので可能であるが日常生活ではこのたし算はあまりしない。物理の問題でも実際に可能かどうか、意味があるかどうか現実を土台として考える必要がある。東京の人口密度2万(人/km²)と北海道の人口密度67(人/km²)のたし算は意味がない、あるいは操作不可能である。しかし、気体の密度については、窒素1.250(g/l)と酸素1.429(g/l)あるいは二酸化炭素1.977(g/l)はシリンジ(注射器)の中で操作できるのでこのたし算は実施可能である。でも液体や固体の密度のたし算は人間の力では不可能である。

人が歩く速さ2(m/秒)と自転車の速さ10(m/秒)をたすことに意味はないが、60(km/時)の列車の中を4(km/時)で歩く場合にはたし算に意味がある。

力のモーメント $M=FL$ の単位はニュートンメートル(Nm)であり、仕事 $W=FS$ の単位は高校の教科書では同じ記載である。しかし、たし算は全く意味がない。元々異なる定義であり、それぞれの物理量を空間的、操作的あるいは体験的に理解しているかが問われてくる。

d 引き算：引き算の意味は？・・ 基準のと比較

[基準からの差] = [対象の物理量] - [基準の物理量]

たし算では意味がなかった量も引き算は可能であることが多い。A君の身長160cmからB君の170cmを引く $A-B = -10$ cmの意味は、B君を基準とした差、つまりB君から見ると下の方向(マイナスの方向)に10cmに見えることである。速さも同様で人の歩く速さ $A=2$ (m/秒)と自転車の速さ $B=10$ (m/秒)の $A-B = -8$ (m/秒)はBを基準としたときの速さとの差となる。たし算の時と違い有用な意味がある。

2 長さの単位の歴史

東洋の尺貫法は中国が起源であり、西洋のヤード・ポンド法などと同様、当初は身体の一部の長さや、穀物の質量などが単位として使われたが、各地で独自の進化を遂げ、国や地方により基本となる単位の値にいくつか違いがある。

日本では16世紀末、秀吉の「太閤検地」が年貢徴収や兵糧計算のための規格統一として知られている。アメリカでは1906年のボルチモア大火をきっかけに規格統一が進んだ。というのは応援にきた周辺都市の消防隊のホースの継ぎ手が合わず被害が大きくなったことの反省による。

メートルは1791年フランス科学アカデミーが北極と赤道の距離から1mを定め、1889年国際度量衡局がメートル原器を作った。1983年国際度量衡総会では真空中の光を基準に1mを規定している。

3 物理量の測定と誤差・精度

物理量は長さ、質量、時間などの7つの基本単位を基準量としている。しかし測定には誤差が必ずつきまとう。

時間については現在セシウム133の電子遷移の放射周期を基準としている。しかしこれを測定して時間を示す腕時計は誰も持ってない。腕時計の場合は昔はゼンマイの力で天秤を振動させ、歯車はその振動を数えて時間を示す。クォーツ時計はゼンマイを電池にして、その電圧が水晶発振子を振動させ、それを数えて時間を示す。クォーツ時計は高価な機械式の時計の十倍以上も正確で1日に数秒以内の誤差である。

速度は距離と時間から計算するが、自動車の場合はタイヤの回転数を数え距離を計算して速度を割り出している。タイヤの直径は道路やスピード、タイヤの摩耗により変化するので誤差は1.5(km/時)が限度である。

古代、イナゴ豆の重量が一定であると信じられていた時代、1個を1カラットとした。誤差は20%以上あり現在であれば大変である。現時点では、基本単位のうち**質量**だけがプラチナイリジウム合金の国際キログラム原器という実物体を基準としている。しかし、1989年に50 μ gの変化が観測され今後の課題となっている。

温度計測装置はガリレオ温度計が史上初であるが、その100年後ファーレンハイトは水銀温度計を作り、華氏32Fを水の凍結温度、人の体温を100Fとした。その20年後セルシウスは水の凍結温度を0 $^{\circ}$ C、沸騰温度を100 $^{\circ}$ Cとした。温度による金属の抵抗変化を利用したデジタル体温計の誤差は0.8 $^{\circ}$ C、プラチナ抵抗温度計は-260 $^{\circ}$ Cから1000 $^{\circ}$ Cまでの広範囲を0.1 $^{\circ}$ C~0.3 $^{\circ}$ C程度の精度で測定できる。

4 身の回りの単位を考える。

1gあたりの値段は工業新聞・経済新聞に毎日出ている。単位を(円/g)に統一して比較する。

白金 4671 (円/g) 金 3489 (円/g)

パラジウム 1600 (円/g)

銀 61950 (円/kg) は換算して \rightarrow 約 62 (円/g)

鉄 平鋼で 93 (千円/トン) \rightarrow 約 0.1 (円/g)

高速度鋼で 2290 (千円/トン) \rightarrow 約 2.3 (円/g)

アルミニウム 214 (円/kg) \rightarrow 約 0.2 (円/g)

スズ 2310 (円/kg) \rightarrow 約 2.3 (円/g)

希少金属のロジウムは 7700 (円/g) と高額である。

さらに身近なものの平均の値段をアバウトに計算してみる。家は20トンで3千万円の場合 1.5 (円/g) 自動車も1トンで130万円とすると 1.3 (円/g) 全自動洗濯機は30kgで15万円 \rightarrow 5.0 (円/g) 電気冷蔵庫は50kgで15万円 \rightarrow 3.0 (円/g) 他の電化製品もおおむねこのレベルだが手元のデジタルマルチメーターは400gで4千円なので10 (円/g) となり家電よりは高価な電気製品といえる。高額なものは、マイクロプロセッサで30gで3万円 \rightarrow 1000 (円/g) である。

5 組立単位の扱い

単位を組合せて様々な物理量を定義できるが、次の例は2つの**組立単位**の扱い(かけ算)を理解することができる。石焼ビビンバ鍋が石ではなくアルミの店があったので、**体積比熱(容積比熱)**を出してみた。ちなみにビビンバの石鍋は2.7kgで3千円 \rightarrow 1.1 (円/g) である。さて、**比熱と密度**を乗算すると**体積あたりの比熱**が出る。

$$\text{密度} \times \text{比熱} = \text{体積比熱}$$

アルミニウム 2.7 (g/cc) \times 0.9 (J/g \cdot K) = 2.4 (J/cc \cdot K)
 花崗岩 3.0 (g/cc) \times 0.8 (J/g \cdot K) = 2.4 (J/cc \cdot K)
 鉄 7.86 (g/cc) \times 0.48 (J/g \cdot K) = 3.7 (J/cc \cdot K)

この操作は密度と比熱がわかれば体積比熱がわかるということである。**言語的な説明**は、密度の単位(g/cc)は1cm³あたりのg質量である。比熱の単位(J/g \cdot K)は1gを1K上昇させるとき必要な熱量(ジュール)のことである。これをかけ算すると(J/cc \cdot K)の単位になるが、意味は1cm³あたり1K温度上昇させるとき必要な熱量J(ジュール)のことである。

計算した**体積比熱**の値を見ると石焼きビビンバの石鍋とアルミニウム鍋は性能がほぼ同じだが、鉄は保温性能は低くかつかなり重そうだということがわかる。体積比熱は持ち運んで重さをはかることのない建材などで使われる。つまりコンクリートブロックや石等を暖冷房に使う場合の熱容量は体積比熱を知っていれば、その場でも縦、横、高さを測定して求めることができる。

6 問題を解く

物理量の扱いを体得するには問題演習が大切であるが、その場合どのような方法で解決するかを次のように生徒に伝えている。(著者の指導例です。)

a イメージする・・・問題を図示すること

単位が同じでも「たし算」に意味がない事例からも、現実的把握が大切で、まず図にすることから始まる。自分自身が確実に把握するための図である。また、図にはできるだけ問題文の全てを書き入れる。

b 法則・定義・式・・・を表現すること

言語的表現、例えば「速さは時間あたりの距離」という言葉の理解は最も大切である。同時に記号的理解「 $v = s / t$ 」も一緒に覚えることが大切である。

c 理解できるように代入式には単位を必ず入れること

例えば、 $s = 10(\text{m})$ 、 $t = 5(\text{s})$ のとき

$v = s / t = 10(\text{m}) / 5(\text{s})$ のように単位を示し、物理量の操作がわかるようにすること。

この確実な理解があれば、その後の単位は省略可。

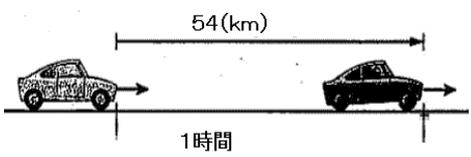
d 最後の答えには簡単な解説と単位を必ず入れること

速度の場合は、南向きに $2(\text{m} / \text{s})$ と記述する。

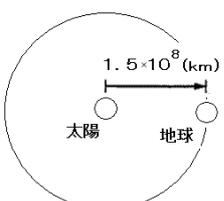
具体的な問題例を、配点の例も含めて下記に示す。

問題例 枠内に指示どおり解答せよ。 10点

(1) 東向に $54(\text{km}/\text{h})$ で走る自動車の速さは何 (m/s) か?

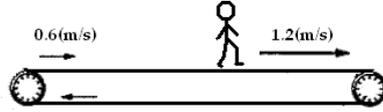
<p>図</p> 	<p>減点法 図 2点</p>
<p>法則・式</p> <p>距離 $v = x / t$ 速さ = $\frac{\quad}{\quad}$ 時間</p>	<p>代入式 $54(\text{km})$ $v = \frac{\quad}{\quad}$ 1(h)</p> <p>法則式 2点 代入式 2点</p>
<p>計算 $54 \times 1000(\text{m})$ = $\frac{\quad}{\quad}$ $1(\text{h}) \times 60(\text{分}/\text{h}) \times 60(\text{s}/\text{分})$</p>	<p>答 東向きに = $15(\text{m}/\text{s})$</p> <p>計算 2点 答 2点</p>

(2) 地球は1年間で太陽の回りを1周する。何 (km/s) で運動しているか? 地球と太陽間は $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ とする。 14点

<p>図</p> 	<p>図 3点</p> <p>法則・式 円周 $x = 2\pi r$ $x = 2\pi r$ $v = \frac{\quad}{\quad} = \frac{\quad}{\quad}$</p> <p>法則式 3点</p>
--	---

<p>代入式 2点 (単位 2点) $v = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 1.5 \times 10^8 (\text{m})}{1(\text{h})}$</p> <p>$= \frac{2 \times 3.14 \times 1.5 \times 10^8 (\text{km})}{1 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 (\text{年})(\text{日}/\text{年})(\text{時}/\text{日})(\text{分}/\text{時})(\text{s}/\text{分})}$</p> <p>= $30 (\text{km} / \text{s})$</p>	<p>代入式 3点 単位 3点 答 2点</p>
---	----------------------------------

(3) $0.6(\text{m}/\text{s})$ で運動する動く歩道上を、歩道の動く向きに $1.2(\text{m}/\text{s})$ の速さで歩く人の地面に対しての速度を求めよ。 12点

<p>図</p> 	<p>減点法 図 3点</p>
<p>法則・説明 この速度のたし算は可能 $v = v_1 + v_2$</p> <p>代入式 $V = 0.6 + 1.2$ (m/s) (m/s)</p>	<p>法則説明 3点 代入式 3点</p>
<p>計算 = $1.8(\text{m}/\text{s})$ 答 歩道の動く方向に $1.8(\text{m}/\text{s})$</p>	<p>答 3点</p>

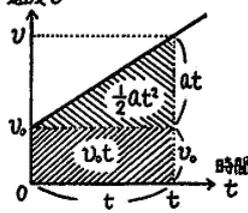
次の問題は物理量の理解をグラフの問題を通じて問うものである。つまりグラフィイメージを示し、言語的表現を書かせて理解度を把握する問題である。単位の扱いについての問いもある。

(4) 等加速度運動の式について説明せよ。 12点

$v = v_0 + a t$ ①
 $x = v_0 t + 1/2 a t^2$ ②
 $v^2 - v_0^2 = 2 a x$ ③

ア ①の式の意味を説明せよ。(各3点配点)

速度は初速に時間とともに加速した速度をたしたもの
 下図で②を説明せよ。イ 三角形の部分の説明

<p>速度 v</p>  <p>時間 t</p>	<p>加速成分により移動した距離 で $1/2 a t^2$ のこと ウ 長方形の部分の説明 初速成分で移動した距離 で $v_0 t$ のこと エ その面積は何を示すか タテ×ヨコ = $(\text{m} / \text{s}) \times (\text{s}) = (\text{m})$ より距離を示す。</p>
--	--

次の問題はベクトルと三角比を図示する問題である。ベクトルの図示、三角比の図示、比例式（分数式も可）にも配点している。

- (5) 地面に対して 30° の角度で、速さ 40 m/s で離陸していく飛行機の水平方向、鉛直方向の成分をそれぞれ求めよ。 $(\sqrt{3}=1.7 \text{ とする})$

<p>三角比</p>	<p>式 $40 : x = 2 : \sqrt{3}$ (m/s) (m/s)</p> <p>$40 : y = 2 : 1$ (m/s) (m/s)</p> <p>$x = 20\sqrt{3} \text{ (m/s)}$</p> <p>$y = 20 \text{ (m/s)}$</p> <table border="1"> <tr> <td>水平方向</td> <td>垂直方向</td> </tr> <tr> <td>$20\sqrt{3} \text{ (m/s)}$</td> <td>20 (m/s)</td> </tr> <tr> <td>$= 35 \text{ (m/s)}$</td> <td></td> </tr> </table>	水平方向	垂直方向	$20\sqrt{3} \text{ (m/s)}$	20 (m/s)	$= 35 \text{ (m/s)}$		<p>1 6 点</p> <p>図 2 点</p> <p>三角比</p> <p>2 点</p> <p>比例式 1</p> <p>2 点</p> <p>比例式 2</p> <p>2 点</p> <p>式 x 2 点</p> <p>式 y 2 点</p> <p>水平 2 点</p> <p>垂直 2 点</p>
水平方向	垂直方向							
$20\sqrt{3} \text{ (m/s)}$	20 (m/s)							
$= 35 \text{ (m/s)}$								

次はベクトルの差（引き算）の理解を問う問題である。

- (6) 図は速度 \vec{v}_A で歩く人が雨滴を見たようすである。歩く人から見れば、地面に静止している物体は $-\vec{v}_A$ の速度をもつ。雨滴が地面に対して \vec{v}_B で落下すれば、人に対する雨滴の相対速度 \vec{v} はどうなるか？



9 点

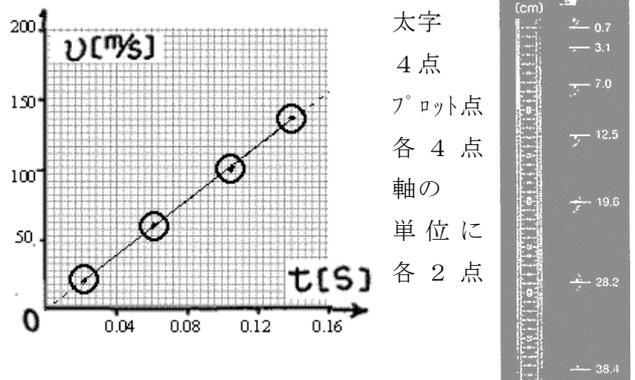
<p>説明図</p>	<p>説明</p> <p>人が基準であり、V_A から V_B を見るベクトルである。</p> <p>答 $V_B - V_A$ となり V_A からみて図のように斜め下後方に見える。</p>	<p>各 3 点</p>
------------	--	--------------

これは「引き算」の概念の確認で、算数での引き算の形 $[\text{基準からの差}] = [\text{対象の物理量}] - [\text{基準の物理量}]$ とベクトルの引き算 $[\mathbf{V}_A] - [\mathbf{V}_B]$ は同じであり、 $[\mathbf{A}] - [\mathbf{B}]$ の場合、 $[\mathbf{B}]$ が基準になる。授業で生徒に強調した内容を確認する問題である。

グラフや表はプレゼンテーションによく用いられ、見てわかりやすいことが求められる。当然「量」や「単位」などもわかりやすく説明がかけられてなければならない。

- (7) 下記は自然落下のデータである。空欄に値を入れ、グラフを完成させよ。 10 点

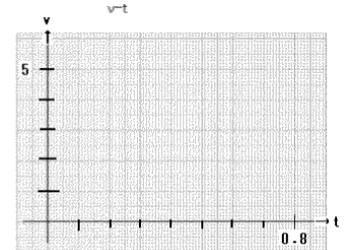
時間(t)	0	0.04	0.08	0.12	0.16	0.2
位置(x)	0	0.7	3.1	7	12.5	
速度(v)		17.5	60	97.5	137.5	
加速度(a)		1063	937.5	1000		



次の問題(8)の採点基準は、軸スケールの10分の1以内の誤差でプロットし軸には単位を入れることである。

- (8) $v - t$ グラフを完成し、問いに答えよ。 12 点
* グラフには横軸、縦軸に値を最低2カ所入れること。また、各軸の単位も入れること

t	$\Delta s / \Delta t$
時間 t(s)	速度 v(m/s)
0.05	0.24
0.15	1.12
0.25	2.08
0.35	2.90
0.45	3.70
0.55	4.48
0.65	4.96
0.75	5.00



プロット点 6 点 軸のスケール値 4 点 軸の単位 2 点

- (9) $v - t$ グラフから読み取れることは何か。 5 点
はじめのうちは等加速度運動で時間に比例して速度は増加するが、0.5 秒ぐらいから加速度が小さくなり最後は速度一定になった。

この問題の総得点は 100 点である。図示に不備があれば 15 点、単位の記述がなければ 20 点、言葉による説明力がなければ 15 点の減点となる。

あらかじめ問題解答の訓練を行い、生徒が勉強すれば平均点は 65 点以上になる。しかし満点の生徒は少ない。一方、訓練次第であるが 30 点以下の生徒も少ない。