

物理便利帖

大槻義彦・小出昭一郎 著

光の速度

$$v = c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$v \ll c$ ならば

$$v = c(1 - v/c)$$

8. $E_{Ar} \quad Ar$

距離 Δx

4.0.1

の距離, $a: 2$ 本の

四角の半径

$$= \frac{(2m+1)}{2}$$

物理学One Point——25

小出昭一郎・大槻義彦 編

物理便利帖

大槻義彦・小出昭一郎 著

「物理学 One Point」

刊行にあたって

山道と同じように物理学にも急所と難所がある。大物理学者といえども、どうにもわからないという難所もあれば、ちょっと登るとひろびろとした展望が開ける急所もある。

たとえば「温度とは何か」、「質量とは何か」といった疑問は中学生の頃から多くの人の心の片すみに晴れやらぬ欲求不満として残っていると思う。ところが、これらは高校の物理になっても、大学の物理学になっても、どうもすっきりと解決しない。大学院に進学して専門的に物理学を学んでいる人々にさえ、このもやもやは残っているのである。

物理を職業に選んだ先生方というのは急所をおさえて難所を突破し、それによって物理学の面白さに魅了された方々であるが、この先生方はご自分の苦難の道をあまりしゃべりたがらない。

本シリーズは、そんな先生方に、洗いざらいご自分の切り抜けたポイントをお話しいただこうというものである。——もちろんその先生方にも、わからないポイントは正直に「ここまでしかわからない」と白状していただくことにしよう。

小出昭一郎

大槻 義彦

まえがき

9月の、雨のあがった日、東北の山に入ると、美しい紅葉の下、たくさんのきのこが足の踏み場もなく出ている。だから食用きのこも毒きのこも、採ろうと思えばいくらでも採れる。ところが、いざ、自分で一番採りたいと思うきのこを探すとするとすこぶるやっかいである。たくさん生えているきのこの中に、どこをどう探しても、めざす美味なきのこがないのである。

自分で採りたいきのこを今年もたくさん採るためには、それが毎年生えてくる秘密の場所をちゃんと覚えていなければならない。「あんずたけ」はどここの山の南の斜面、「たまごたけ」は別の山の北斜面……という具合に。

物理をはじめて20年も30年にもなると、研究室にはたくさんの物理の本が並んでいる。たて書きの本、横文字の本、ふ厚い本、薄っぺらな本、他人の書いた本、自分の書いた本。ちょっと物理の公式が思い出せない、小さいゾウリムシの泳ぐときの粘性抵抗はどれくらいであろうかなど、とっさに式や数値がほしいとき、手元にあるたくさんの本から、たちどころにそれらを「採れる」人はえらい人である。

たいていの人は、あっちの本、こっちの本の裏表紙と、小1時間もかけて、ため息をつきながら探し回ることになる。あの数値はこの本にある、あの式はこれにあると、秘密のありかを覚えている人は少ないからである。そこで、あなたが求めるもの、物理定数表、物理量の表などが、手軽に使えるかたちでまとまってあったらどんなにか便利であろう。も

ちろん、この種のハンドブックはいろいろあるが、そのほとんどが、物理学の専門の研究者用のものである。これを参考にするのには、それなりの物理的素養がないとなかなか難しい。

本書は、高校生から大学生まで、カバンの中や勉強机に入れておき、手軽に参考できるような、そんな物理小ハンドブックとなることをめざした。学生実験やレポートを書くとき、先生の講義のさなか、自分で物理の本を読んだり、問題を解くとき、気楽な気持ちでこの便利帖をめくってほしい。そして何よりも、何か物理のことを、自然のことをじっくり自分で考えているときに、必要なデータを提供するものとして、本書を活用していただきたい。

これを編集するにあたって、専門分野の多くの参考書から引用させていただいた。心よく引用を同意された各出版社、著者の方々に感謝する次第である。また、好評のうちに、one point シリーズの出版をつづける編集部の責任者、豊田秀一氏に心から感謝する。

1984年1月

著 者

目 次

1 物理基本公式

1-1 力 学	1
速度・加速度	1
ケプラーの法則、ニュートンの法則	1
万有引力と天体の運動	2
慣性力	2
場、保存力場、仕事、エネルギー	3
質量中心 r_G 、相対運動(二体問題)	3
衝突問題	3
剛体の運動	3
1-2 連続体の力学	4
応力と変形	4
流体の運動	5
粘性流体	6
1-3 電磁気学	7
静電気	7
キャパシター	8
電 流	8
電流のつくる磁場	9
電荷(電流)が磁場から受ける力	9

磁性体	10
電磁誘導	10
マクスウェルの方程式	11
1-4 振動, 波動	12
単振動	12
振り子	13
減衰振動	14
非線型振動	14
波動の一般論	15
いろいろな波動	15
ドップラー効果	16
回折, 干渉, 屈折, 反射	17
1-5 熱力学・統計力学	18
熱力学の基本法則	18
状態方程式と種々の熱力学的過程	19
熱伝導と拡散	20
1-6 相対性理論	20
特殊相対性理論	20
1-7 原子物理	22
光量子仮説と物質波	22
シュレーディンガー方程式	22

2 物理定数表

2-1 基礎物理定数	24
2-2 SI単位	25
2-3 常用の計量単位	28

2-4 エネルギー諸単位の換算	32
2-5 密度, 慣性モーメント	33
元素の密度	33
諸物質の密度	34
慣性モーメントの例	36
2-6 弾 性	37
等方性物質の諸弾性率	37
種々の結晶の弾性率	38
2-7 摩擦, 粘性, 表面張力	39
固体の摩擦係数	39
液体の粘性率	39
気体の粘性	40
種々の物質の表面張力	40
2-8 物質中の音速	41
気体中の音速	41
液体中の音速度	41
固体中の音速	42
2-9 熱膨張率	43
液体の体膨張率	43
固体の線膨張率	44
2-10 比 熱	45
諸物質の定圧比熱	45
金属の電子比熱	48
2-11 熱伝導率	49
気体の熱伝導率	49
液体の熱伝導率	49

固体の熱伝導率	49
熱伝導率の温度変化	51
2-12 相転移	52
諸物質の転移温度、転移熱	52
臨界温度、臨界圧力および臨界密度	56
単体の蒸気圧	57
水の沸騰点の圧力依存性	58
飽和水蒸気圧	59
2-13 誘電率	60
諸物質の比誘電率	60
2-14 電気抵抗	62
金属の電気抵抗率と温度係数	62
溶融状態の金属および半金属の電気抵抗率	63
低温における純粋金属の電気抵抗率	64
絶縁物質の電気抵抗率	66
仕事関数	67
2-15 電磁氣的諸量	67
電磁氣的諸量の換算表	67
電磁氣的諸量の次元	68
半導体のエネルギーギャップと格子散乱キャリア	
移動率(室温値)	69
超伝導体の臨界温度	70
2-16 磁 性	72
元素の常温グラム帯磁率 $\times 10^6$ の値	72
代表的な反強磁性体結晶のネール温度 T_N と θ	72
強磁性体、フェリ磁性体	74

2-17	光の吸収	75
	気体の吸収係数	75
	液体の吸収係数	76
	固体の透過率	76
2-18	光の屈折率	77
	空気の屈折率	77
	種々の気体の屈折率	77
	液体の屈折率	77
	固体の屈折率	78
	特殊な物質の屈折率	79
	絶縁体と半導体の誘電率	80
2-19	レーザー波長	81
	原子・分子の発光	81
	紫外領域	85
	半導体レーザー	85
	色素レーザー	86
2-20	電磁波と光(量)子	87
	電磁波の波長と光子のエネルギー	87
2-21	元 素	88
	原子量	88
	元素周期律表	90
	元素の存在度	92
2-22	原子とその結合	93
	代表的な元素, 化合物の結晶構造	93
	元素単体の結晶構造, 原子半径, イオン半径	93
	炭素を含まない場合の原子間距離	96

炭素を含む場合の原子間距離	97
2-23 原子内電子	98
中性原子の電子配置	98
H から Rn までの原子のエネルギー準位	100
元素の特性 X 線スペクトル	106
元素の X 線吸収端	109
2-24 原子核	111
原子核の同位体存在比	111
天然放射性核種の崩壊系列	117
2-25 素粒子	118
レプトン光子族	118
ハドロノ I —— 中間子族	118
ハドロノ II —— 重粒子族	120

3 数学公式

3-1 2 次, 3 次, 4 次方程式	122
2 次方程式	122
3 次方程式	122
4 次方程式	123
$x^n = a$ の根	124
3-2 三角関数と双曲線関数	124
三角関数	124
双曲線関数	125
3-3 スターリングの公式	126
3-4 べき級数展開	126
3-5 曲線, 曲面	130

3-6	ベクトル	131
	ベクトルの積	131
	ベクトルの微分	131
	よく出てくるナブラ演算	133
	ベクトルの積分	135
3-7	曲線座標と ∇	137
	一般の曲線座標	137
	円柱座標	137
	球座標	138

1

物理基本公式

1-1 力学

1. 速度・加速度

$$1.1.1 \quad v = \frac{dr}{dt}, \quad a = \frac{dv}{dt}$$

その2次元極座標による表示

$$1.1.2 \quad v_r = \frac{dr}{dt}, \quad v_\theta = r \frac{d\theta}{dt}$$

$$1.1.3 \quad a_r = \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2$$

$$1.1.4 \quad a_\theta = 2 \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} + r \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\theta}{dt} \right)$$

2. ケプラーの法則、ニュートンの法則

ケプラーの法則

1.2.1 第一法則 あらゆる惑星は、太陽をその焦点の一つとするだ円軌道を描く。

1.2.2 第二法則 面積速度は時間によらず一定である。

1.2.3 第三法則 惑星の公転周期の二乗と軌道の長径の三乗の比は、すべての惑星に共通である。

ニュートンの法則

1.2.4 第一法則 慣性の法則

1.2.5 第二法則 $\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}$ ($\mathbf{p} = m\mathbf{v}$)

1.2.6 第三法則 作用・反作用の法則

$$\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$$

3. 万有引力と天体の運動

1.3.1 $\mathbf{F} = -G \frac{mM}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r}$

1.3.2 万有引力の定数 $G = 6.6720 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$

1.3.3 角運動量保存則 $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \text{一定}$ (中心力の場合)

1.3.4 エネルギー保存則 $\frac{1}{2}mv^2 - G \frac{Mm}{r} = \text{一定}$

1.3.5 極座標 (r, θ) で表した軌道 $L = mr^2\dot{\theta} = mh$ とすると

$$r = \frac{l}{1 + \epsilon \cos \theta}$$

ここに $l = \frac{h^2}{GM}$

$$\epsilon = \left(1 + \frac{2Eh^2}{G^2M^2m} \right)^{1/2} \quad (\text{離心率})$$

$0 < \epsilon < 1$ ($E < 0$) の円軌道, $\epsilon = 1$ ($E = 0$) の放物線軌道,

$\epsilon > 1$ ($E > 0$) の双曲線軌道

4. 慣性力

1.4.1 遠心力 $\mathbf{F} = -m\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$
(大きさは $F = mr\omega^2$)

1.4.2 コリオリの力 $\mathbf{F} = -2m\boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt}$

1.4.3 $\boldsymbol{\omega}$ の時間的変化が与える力

$$\mathbf{F} = -m \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r}$$

5. 場, 保存力場, 仕事, エネルギー

1.5.1 $\mathbf{F} = -\text{grad } V$

1.5.2 $\frac{1}{2}mv^2 + V = \text{一定}$ (力学的エネルギー保存則)

1.5.3 仕事 $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$

6. 質量中心 r_G , 相対運動 (二体問題)

1.6.1 $\mathbf{r}_G = \frac{m_1\mathbf{r}_1 + m_2\mathbf{r}_2}{m_1 + m_2}$ 外力=0 のとき $\dot{\mathbf{r}}_G = \text{一定}$

1.6.2 相対運動 $m^* \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F}_{12}$ (1 が 2 から受ける力)

ここで $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$

1.6.3 m^* は換算質量 $m^* = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$

7. 衝突問題

1.7.1 運動量保存則 $\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_1' + \mathbf{p}_2'$

1.7.2 衝突径数 b : 入射軌道と散乱中心との距離

8. 剛体の運動

1.8.1 回転運動方程式 $I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \mathbf{N}$

1.8.2 力のモーメント $\mathbf{N} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$

1.8.3 慣性モーメント $I = \sum_i m_i r_i^2 = \int \rho r^2 dv = Mk^2$
(k : 回転半径)

1.8.4 質量中心を通る軸のまわりの慣性モーメント I_G がわかると, それから h だけ隔たり, その軸に平行な軸のまわりの慣性モーメント I は

$$I = I_G + Mh^2$$

1.8.5 平板の慣性モーメント (板に垂直な軸を z)

$$I_z = I_x + I_y$$

1.8.6 エネルギー保存則

$$\frac{1}{2} M v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 + (\text{位置エネルギー}) = \text{一定}$$

1.8.7 剛体振り子 (実体振り子, 物理振り子)

その周期

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{Mgh}} = 2\pi \sqrt{\frac{k^2}{gh}}$$

ここに k は回転半径 (1.8.3 で定義)

1-2 連続体の力学

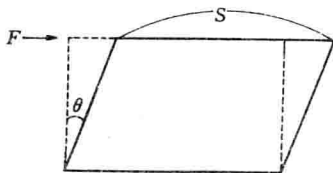
1. 応力と変形

2.1.1 フックの法則: (応力) $\propto$ (ひずみ)2.1.2 引張り (ヤング率 E)

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$$

2.1.3 ずれ (剛性率 G)

$$\frac{F}{S} = G \theta$$

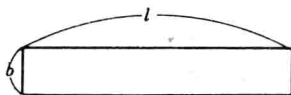
2.1.4 圧縮 (体積弾性率 K)

$$\frac{F}{S} = -K \frac{\Delta V}{V}$$

$$\text{圧縮率 } \kappa = \frac{1}{K}$$

2.1.5 ポアッソン比

$$\sigma = - \frac{\Delta b/b}{\Delta l/l}$$



2.1.6 弾性率の関係

$$1. \quad G = E/2(1 + \sigma)$$

$$2. \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\sigma)}$$

$$3. \quad E = \frac{9KG}{3k + G}$$

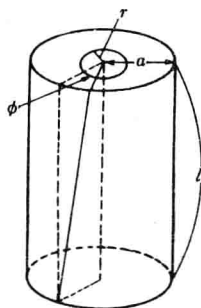
2.1.7 ねじれ

1. 半径 r の点の応力

$$p = G \frac{r\phi}{l}$$

2. ねじれのモーメント

$$C = \pi G a^4 \phi / 2l$$



2. 流体の運動

2.2.1 連続の方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0$$

(ここに ρ : 密度, $\mathbf{v}$: 速度ベクトル)

2.2.2 特に非圧縮性流体 ($\rho = \text{一定}$) の場合

$$\mathbf{v}S = \text{一定} \quad (S: \text{流管の断面積})$$

2.2.3 ベルヌーイの定理 (完全流体)

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z = \text{一定} \quad (\text{流線に沿って})$$