

ま え が き

著者の恩師の一人が「物理学を学ぶことは推理小説を読むようなものである」と、おっしゃっていた。現場検証(実験データ)をもとに論理的に推理(考察)し、その過程で新しい事実が判明し、それをもとにさらに推理(考察)をし、その繰返しの後に真実に近づいてゆく、という点で類似性を感じるそうである。著者は推理小説は読まないのですがこの言葉を十分理解することはできないが、「小説」という点に関して別の観点から話をつないでみる。

「小説」とはもともと中国語であるが、その意味は文字通り「取るに足りない説」であるそうな。井沢元彦氏の「逆説の日本史」にそのような言葉が載っていた。以下、著者が読みとった範囲でその意味をまとめると、儒教の世界では、嘘をつくことは非常に大きな背徳となる。「小説」はフィクション、つまり作り話であり、現実には起こっていない「嘘」を描いたものであるから、古来「取るに足りない説」として低く見られていたそうな。逆に歴史書などは「事実」を書いたものであるから、古来重要視されてきたそうな。小説にも、現実に起こってもおかしくない現実的なものもあれば、歴史書もそれを書いた時代の王朝に有利なように脚色した部分もあればで、様々であると思うが…いや、本書は物理学の本(のつもり)であるから、この辺りで止めておこう。

さて、著者はこれまで物理学を楽しんできた。その過程で学んだ経験をもとに少々過激な表現をとると、「理論物理学というのは嘘の世界である。」となる。つまり人間の頭には限界があり、例えば物体が落下するという単純な自然現象であっても、そこで生じている事柄すべてを取り込んだ議論をすることは、ほぼ不可能である。そのため、曰く質点と見なす、曰く空気抵抗は無視する、曰く重力加速度は一定である、などのようにデフォルメをした模型を作り、その模型を動かしながら議論を行う。その意味で「嘘」ではある。

しかしこの嘘にもそれなりに使い道がある。自然現象について議論する場合には必ず実験データと理論的な考察をつきあわせることになるのだが、実験データにも誤差が含まれており、その誤差の範囲内で両者が一致していれば、その理論は正しい、あるいはその理論を用いて自然現象を説明することができた、と見なすのである。一つの理論で様々な自然現象を説明することができれば、その理論は自然現象に関する基本法則となる。その例がニュートンの運動の法則である。ただし、模型をもとに構築した理論であるため、おのずと適用限界がある。分子や原子などの微小な現象はニュートン力学ではなく量子力学で議論され、光速に近い運動をする現象では相対論を用いて議論される。

本書は大学工学部の学生が読むことを意識して著した。工学系の学部では、専門で使う物理法則は専門科目で教わるので、教養の「物理学」の授業で無理に詰め込む必要はない。また本に書かれている物理法則をわざわざ覚える必要はなく、その法則が仕事に必要であれば本を見ればよいだけである。仕事で頻繁に使う物理法則であれば、無理に詰め込まなくても自然と覚えているものである。したがって、工学部の学生が単位を取るためだけ、物理法則を覚えるためだけに「物理学」を学ぶ意味はないであろう。それよりも、必要に応じて書物を開いたとき、その書物を読むことができるだけの基礎を作っておくこと、すなわち考察の方法を体得しておくことのほうが大切であろう。

また、ものを作る際にも闇雲に試行錯誤をするのではなく、どこを変更すれば動作がどのように変わるかなどの実験データを取り、そこから動作の傾向を読み取れば、試行錯誤の量が減り、開発の効率は上がるだろう。その過程は、模型を作って理論を構築する物理学と同じである。つまり、物理学の手法や考え方は、広く工学の世界にも応用が可能であると思われる。

このように、単に物理法則を覚えるために本書を読むのではなく、物理学の手法や考え方に親しんで、この先の仕事に生かすように願っている。

2014年1月

目 次

1. 基 本 事 項

1.1 目 標	1
1.2 単 位	1
1.3 次 元	3
1.4 質 点	4

2. 運 動 学

2.1 一次元の運動	5
2.1.1 質点の位置	6
2.1.2 質点の速さと速度	6
2.1.3 加 速 度	10
2.2 三次元空間内の運動	11
2.2.1 質点の位置	11
2.2.2 質点の速さと速度	12
2.2.3 加 速 度	13
2.3 式で表された運動	14
2.3.1 式の言語化	14
2.3.2 運動の定式化	16

3. 運動の基本法則と一様重力

3.1 ニュートンの運動に関する三法則	17
3.1.1 第一法則	18
3.1.2 第二法則	18
3.1.3 第三法則	20
3.2 一様重力場のもとでの運動	21
節末問題	28
3.3 仕事とエネルギー	28
3.3.1 仕事	29
3.3.2 仕事と運動エネルギー	32
3.3.3 保存力と位置エネルギー	33
3.3.4 位置エネルギーの基準	37
3.3.5 力学的エネルギー保存則	37

4. 質点の力学1：摩擦力

4.1 静止摩擦力	44
4.2 動摩擦力	46
節末問題	49

5. 質点の力学2：振動運動

5.1 等速円運動	50
5.1.1 運動方程式の解	51
5.1.2 向心力と遠心力	52

5.2 つるまきばねによる単振動	53
5.2.1 ばねの性質	53
5.2.2 ばねに取り付けられたおもりの運動	54
5.3 単振り子	60
5.3.1 運動方程式を立てて解く	61
5.3.2 力学的エネルギー保存則：近似なし	62
5.3.3 力学的エネルギー保存則： α および θ が小さい場合の近似	64
節末問題	65

6. 動く観測者

6.1 座標軸の向きが変わらない場合の変換則	67
節末問題	72
6.2 回転する座標系	74
6.2.1 回転の表現	74
6.2.2 S' 系から見た運動方程式	75
6.2.3 見かけの力	76
6.2.4 応用例	80

7. 質点系の力学

7.1 作用・反作用の法則と運動量保存の法則	83
節末問題	85
7.2 重心運動と相対運動	85
7.2.1 外力が働かない場合	85
7.2.2 相対運動と換算質量	88
7.2.3 一様重力場のもとにおける2個の質点の運動	89

7.2.4	重 心	90
-------	-----	----

8. 剛 体 の 運 動

8.1	力のモーメントと剛体の釣合い	93
8.1.1	ヤジロベエ	94
8.1.2	釣合いの条件	96
8.1.3	剛体の釣合い	99
8.2	剛体の回転運動の記述	105
8.2.1	角運動量	105
8.2.2	慣性モーメント	107
8.2.3	剛体の慣性モーメント	109
8.3	回転軸がわかっている場合の剛体の回転運動	115
8.3.1	回転運動の運動方程式	115
8.3.2	回転運動のエネルギー	118
8.3.3	剛体の平面運動	119

9. 弾 性 体 の 力 学

9.1	応 力	126
9.2	弾性に関する定数	127
9.2.1	伸び・縮みとヤング率	128
9.2.2	伸び・縮みとポアソン比	132
9.2.3	ずれとずれ弾性率	132
9.2.4	膨張・圧縮と体積弾性率	136
9.2.5	弾性に関する定数の間に成り立つ関係	138

10. 流体の力学

10.1 静止流体	143
10.1.1 静止流体中の圧力の性質	144
10.1.2 静止した非圧縮性流体の圧力	145
10.2 完全流体の力学	149
10.2.1 連続方程式	150
10.2.2 ベルヌーイの法則	153
10.2.3 応用例	155
10.3 粘性のある流体	158
10.3.1 ハーゲン-ポアズイユの法則	159
10.3.2 レイノルズ数	161
10.3.3 抵抗法則	162
付 録	165
A.1 座 標 系	165
A.1.1 デカルト座標	165
A.1.2 二次元極座標	166
A.1.3 円筒座標	167
A.1.4 三次元極座標(球座標)	168
A.1.5 自然座標	169
A.2 偏微分と全微分	172
A.2.1 偏 微 分	172
A.2.2 全 微 分	172
A.3 スカラー場, ベクトル場	173
A.4 微分方程式	174

A.4.1	変数分離形の微分方程式	174
A.4.2	単振動の微分方程式と変数分離形	174
A.4.3	二階の線形微分方程式	175
A.4.4	二階の定数係数線形斉次微分方程式	176
A.4.5	線形斉次微分方程式としての単振動の微分方程式	177
A.5	回転する座標系	177
A.5.1	回転するベクトル	177
A.5.2	回転する座標系の速度と加速度	179
A.6	x, y, z 軸上の点と原点を頂点とする四面体	181
	引用・参考文献	183
索	引	184

1 | 基本事項

1.1 目 標

本書では古典力学の範囲で理解される現象を扱う。その際、ニュートンの運動に関する三法則を基本法則として、それに関わる様々な自然現象を説明することを目標とする。「まえがき」にも記したが、単に物理法則を覚えるのではなく、それらがどのようにして基本法則から導かれるか、その考察の過程をきちんと理解して頂けたらと思う。

1.2 単 位

そもそも単位とは何か。科学や工学では、自然現象や作成物の性質を知るために、実験や観測によって長さや質量など諸々の物理量(あるいは単に「量」という)を測定し、得られた測定結果をもとにして議論を進める。物理量を測定するためには、その量の大きさを表す基準となるものが必要である。ある物体の長さであれば、足のつま先からかかとまでの長さの3倍(3フィート)、親指と人差し指を広げた長さの6倍(3尺か?)など、基準となるものを決めて、物体の長さはその何倍、という形でのみ表すことができる。基準としたものが単位であり、科学や工学は単位なしには成り立たない。例外は同じ物理量どうしの比(例えば半径と円弧の長さの比)であるが、これも分母にくる量の何倍か、という量であるから、やはり基準はある。

2 1. 基本事項

単位は人が決めるものであるから、今でも国や地域により異なる単位が使われていることは周知の通りである。その状態のままであれば、科学や工学の議論をするときや商取引をするときなど、たがいに単位を比較し合い、自分が持っている数値を相手に合わせて換算し、その後ようやく議論や取引が成立するという、非常に不便な状態になる。そこでかつて秦の始皇帝は、中華の地を統一するとともに度量衡の統一を行った。現代でも世界中で同じ単位が使えることの利便性に変わりはない。

そのため、世界的に統一された単位系である**国際単位系** (Système International d'Unités, 略称：**SI 単位**) が定められた。SI 単位は、表 1.1 の 7 個を**基本単位**として構成されている。これ以外の量の単位はすべてこれらの組合せで表され、**組立単位**と呼ばれている。例えば速さは m/s という組立単位で表される。組立単位の中には表 1.2 のように固有の名称を持つ単位もある。また、巨大な量や微小な量を表すために表 1.3 に示されている接頭語が指定されている。例えば長さの cm や電流の mA などである。

表 1.1 SI 基本単位

量	記号	読み
時間	s	秒
長さ	m	メートル
質量	kg	キログラム
電流	A	アンペア
温度	K	ケルビン
物質량	mol	モル
光度	cd	カンデラ

表 1.2 固有の名称を持つ SI 組立単位の例

物理量	記号	読み	SI 基本単位 による表現
力	N	ニュートン	kg m s^{-2}
応力	P	パスカル	$\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
仕事	J	ジュール	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
仕事率	W	ワット	$\text{kg m}^2 \text{s}^{-3}$
平面角	rad	ラジアン	
立体角	sr	ステラジアン	

ところで単位として基準にする量も、その大きさを測定することで基本単位として定義されるため、技術の進歩により測定精度が向上すると、基本単位の定義が変わる場合がある。基本単位の定義とその変遷については他書に譲るが、理科年表¹⁾†などを参考に、定義の変遷を調べてみるのも面白いだろう。

† 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

表 1.3 接頭語

名称	記号	大きさ	名称	記号	大きさ
ヨタ (yotta)	Y	10^{24}	ヨクト (yocto)	y	10^{-24}
ゼタ (zetta)	Z	10^{21}	ゼプト (zepto)	z	10^{-21}
エクサ(exa)	E	10^{18}	アト (atto)	a	10^{-18}
ペタ (peta)	P	10^{15}	フェムト(femto)	f	10^{-15}
テラ (tera)	T	10^{12}	ピコ (pico)	p	10^{-12}
ギガ (giga)	G	10^9	ナノ (nano)	n	10^{-9}
メガ (mega)	M	10^6	マイクロ(micro)	μ	10^{-6}
キロ (kilo)	k	10^3	ミリ (milli)	m	10^{-3}
ヘクト(hecto)	h	10^2	センチ (centi)	c	10^{-2}
デカ (deca)	da	10^1	デシ (deci)	d	10^{-1}

1.3 次 元

次元は、計算結果の確認などに使われる重要な概念である。次元という言葉で最初に思い浮かべるのは、直線が一次元、平面が二次元、立体が三次元、というものであろう。この数字一、二、三は、例えばたがいに直行する直線の最大数である、と解説される。直線の大きさは長さ (SI 単位で m) で、平面であれば面積、つまり長さを 2 回掛けた量 (SI 単位で m^2) で、立体であれば体積、つまり長さを 3 回掛けた量 (SI 単位で m^3) で、それぞれ表される。すなわち、直線の大きさは長さに関して 1 次の量なので一次元、平面の大きさは長さに関して 2 次の量なので二次元、立体の大きさは長さに関して 3 次の量なので三次元、と考えればよい。物理学でいう次元は、この概念を長さだけでなく、質量や時間などに拡張したものである。特に力学の範囲内では、長さ、質量、時間の 3 種類の量の組合せですべての物理量が表される (電磁気学ではこれらに電流が加わる)。例えば速度は (SI 単位で m/s なので) 「長さに関して 1 次元、質量に関して 0 次元、時間に関して -1 次元」という次元を持つ、と考えるのが、物理学でいう次元である。もう一つ例を挙げると、力は「長さに関して 1 次元、質量に関して 1 次元、時間に関して -2 次元」の次元を持つ。このとき長さの単位が「尺」になろうと、質量の単位が「匁 (もんめ)」になろうと、時間の単

位が「刻」になろうと、次元は変わらない。

ところで次元の表記を上記のように「長さに関して...」とするのは冗長である。そこで長さに L (length), 質量に M (mass), 時間に T (time) という記号をあて、速度の次元であれば $[L T^{-1}]$, 力の次元であれば $[L M T^{-2}]$ と表すのが一般的である。

直線の長さや平面の面積との間で大小関係を議論するのは無意味であるが、それと同じように、物理学でいう次元が異なる量の間の大小関係を議論することは無意味である。また、問題を解いた結果出てきた答が、求めたい量と次元が異なっていれば、その答は明らかに間違っている。このように、議論に意味があるかどうか、式が正しいかどうかを確認する一つの手段として使えるので、つねに次元の確認をする癖をつけよう。

1.4 質 点

現実には存在しないが、大きさがなく質量のみを持った点のことを質点という。本書では基本的に物体の運動を扱うが、すべての物体には大きさがある。サッカーの無回転シュートや野球のナックルボールは別として、大きさのある物体が動くときには一般的に回転しながらその位置を変えてゆく。回転運動については8章で扱うが、その取り扱いには回転しない物体の運動を扱うよりも少々難しくなる。

実は、一様重力のもと(地表付近)で物体が運動するとき、空気抵抗が無視できる場合には、その物体が回転していてもいなくても、その重心の動きだけに着目すると同じ動きをすることがわかっている。このような場合、物体の全質量が重心の一点に集まっている質点と見なして、その物体の運動を取り扱ってよい(詳細は7.2.3項を参照)。そこで2章から7章の間は、物体を質点と見なして、重心の運動だけを議論することにする。

2 | 運 動 学

古典力学では物体の運動を議論するが、その際に座標軸を定義して、物体の位置を数量的に表す。しかしながら、定義によって議論が楽になることも煩雑になることもある。そのため座標軸の定義にも様々なものがあり、状況によって使い分けられている。ところで、原点の位置や軸の向きを含めて座標軸は人が決める物であり、人によってその定義が異なっている場合があるので、その違いに気づかずに他者との議論を進めても話はかみ合わないであろう。座標軸の定義を明らかにすることはそれほど重要なことである。

本章ではまず、デカルト座標を用いて、物体の位置、速度、加速度を定義する。次に 2.3 節で、表された式から動きを読み取る練習 (日本語訳)、および動きを式で表す練習 (数式訳) を行う。デカルト座標以外にも、円筒座標や極座標など様々な座標の取り方が用いられている。その一部を付録 A.1 に載せた。

2.1 一次元の運動

この節では質点が直線上を運動している系を例に、質点の速度や加速度を定義する。図 2.1 のように質点 P が直線上を運動している場合、運動をする直線に沿って座標軸を取るのが便利である。ここでは紙面に向かって右向きを x 軸

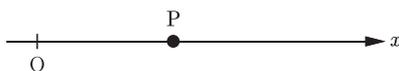


図 2.1 直線上を運動する質点

の正の向きとし、記号 O で示された点を原点とした。

2.1.1 質点の位置

質点 P の位置は、図 2.1 で定義された x 軸を用いて、原点 O からの距離によって表される。その数値には、原点 O よりも紙面に向かって右にあれば正、左にあれば負の符号が付く。例えば、原点 O から点 P までの距離が 5 m で、正の側にあれば「点 P は座標 5 m の位置 (地点) がある」と表され、同じ距離で負の側にあれば「点 P は座標 -5 m の位置 (地点) がある」と表される。

2.1.2 質点の速さと速度

(1) 速度が一定の場合 よく知られているように、一定の速さで動く質点の速さは「移動距離 ÷ 時間」で求められるが、これが「速さ」についての最も基本的な定義である。直線上を一定の速さで運動している質点 P について、図 2.2 のように、時刻 t_1 において位置 x_1 にいた質点が、それより後の時刻 t_2 に位置 x_2 に至ったとすると、移動距離は $x_2 - x_1$ なので、その速さ v_s は

$$v_s = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (2.1)$$

と表される。式 (2.1) を言葉で表すと、「単位時間当りの移動距離」となる。

速度は、日常生活では速さと区別して使われることはほとんどないであろうが、両者の定義は異なる。速度の定義をするために、まず変位を定義する。変位とは位置の変化分であり、図 2.2 のように時刻 t_1 から t_2 への時間の経過により、その位置が x_1 から x_2 へと変化した場合、後の時刻の位置から前の時刻の位置を引き算した $x_2 - x_1$ が変位である。これを用いて「単位時間当りの位置の変化 (単位時間当りの変位)」として、速度 v は



図 2.2 直線上を一定の速度で x 軸の正の向きに運動する質点



図 2.3 直線上を一定の速度で x 軸の負の向きに運動する質点

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \quad (2.2)$$

と定義される。 x 軸の正の向きに動いている質点の場合、式 (2.1) と同じになる。

速さと速度の違いは、図 2.3 のように、質点が x 軸の負の向きに運動しているときに現れる。この場合、時刻 t_1 と t_2 の間に質点が移動した距離は $x_1 - x_2$ (大きい値から小さい値を引く) なので、速さ v_s は

$$v_s = \frac{x_1 - x_2}{t_2 - t_1} = \frac{|x_2 - x_1|}{t_2 - t_1} > 0 \quad (2.3)$$

となる。一方、変位の定義はあくまでも「後の時刻の位置から、手前の時刻の位置を引き算した」ものであるため、速度は

$$v = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} < 0 \quad (2.4)$$

のように負の値になる。式 (2.3) と式 (2.4) から、速さと速度の関係は

$$v_s = |v| \quad (2.5)$$

であることがわかる。「速さ」はどれだけ速く運動しているかしかわからないが、「速度」は符号の正、負によって、 x 軸の正の向きに運動しているか、負の向きに運動しているかという、向きが表現される形で定義されている。

この質点の動きを $x-t$ グラフで表すと、 x 軸の正の向きに等速運動する質点は図 2.4 のようになり、式 (2.2) はこのグラフの傾きを求めていることに相当する。同様に x 軸の負の向きに等速運動する質点は図 2.5 のようになり、式 (2.4) はこのグラフの傾きを求めていることに相当する。

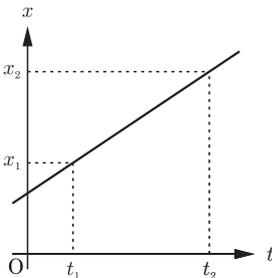


図 2.4 $x-t$ グラフと速度: x 軸の正の向きに運動している場合

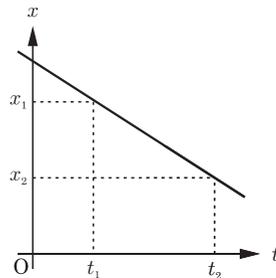


図 2.5 $x-t$ グラフと速度: x 軸の負の向きに運動している場合

(2) 平均速度 平均速度には時間平均と空間平均とがあるが、ここでは時間平均を扱う。同様に平均の速さも時間平均を扱う。

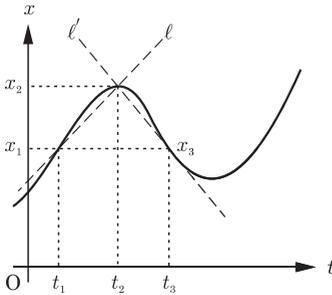


図 2.6 直線上を運動する質点：速度が変化する場合

例として、図 2.1 の直線上を移動する質点 P の位置と時間の関係が、図 2.6 の $x-t$ グラフのように表される場合を考える。このとき質点 P は、初めは x 軸の正の向きへと運動し、途中の時刻 t_1 に $x = x_1$ の点を通り、その後時刻 t_2 に $x = x_2$ の点で折り返して x 軸の負の向きに向かって進み、時刻 t_3 に $x = x_3 (= x_1)$ を通過し、 $x < x_1$ の点で再び折り返して x 軸の正の向きへと運動している。

このとき t_1 と t_2 の間および t_2 と t_3 の間の、それぞれの平均の速さ $\langle v_{s12} \rangle$ および $\langle v_{s23} \rangle$ は、移動距離がそれぞれ $x_2 - x_1$ 、および $x_2 - x_3 = |x_3 - x_2|$ 、移動にかかった時間がそれぞれ $t_2 - t_1$ 、および $t_3 - t_2$ なので

$$\langle v_{s12} \rangle = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}, \quad \langle v_{s23} \rangle = \frac{x_2 - x_3}{t_3 - t_2} = \frac{|x_3 - x_2|}{t_3 - t_2} > 0 \quad (2.6)$$

となる。一方、それぞれの平均速度 $\langle v_{12} \rangle$ 、および $\langle v_{23} \rangle$ は、「単位時間当りの位置の変化」の定義により

$$\langle v_{12} \rangle = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}, \quad \langle v_{23} \rangle = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} < 0 \quad (2.7)$$

となる。 $\langle v_{12} \rangle$ と $\langle v_{23} \rangle$ はそれぞれ図 2.6 の直線 l および l' の傾きである。

ところで式 (2.6) と式 (2.7) の様な場合に限定すれば、平均速度と平均の速さの関係は (2.5) と同様に $\langle v_{s23} \rangle = |\langle v_{23} \rangle|$ であるが、範囲を広げたときにつねにこの等式が成り立つとは限らない。

例えば図 2.6 に示された運動で、時刻 t_1 と t_3 の間の平均の速さ $\langle v_{s13} \rangle$ は、この間の移動距離は $2(x_2 - x_1)$ なので

$$\langle v_{s13} \rangle = \frac{2(x_2 - x_1)}{t_3 - t_1} \neq 0 \quad (2.8)$$

索引

【あ】	ガリレイの相対性原理	69
圧縮性流体	143	ガリレイ変換
圧力	127	換算質量
アルキメデスの原理	148	慣性系
		慣性抵抗
		慣性の法則
		慣性モーメント
【い】	完全流体	149
位置エネルギー	34	
位置ベクトル	11	
一般解	175	
		【き】
		軌跡
		基本単位
		球座標
		極座標
		曲率
		曲率半径
【う】		
運動エネルギー	32	
運動粘性率	162	
運動量	18	
運動量保存の法則	28, 83	
		【く】
		偶力
		組立単位
		【こ】
		広義のエネルギー保存則
		向心力
		剛性率
		剛体
		剛体振り子
		勾配
		国際単位系
		固有方程式
		コリオリ力
【お】		
オイラー方程式	153	
応力	125, 126	
重さ	20	
		【さ】
		最大静止摩擦力
		【し】
		次元
		仕事
		自然座標
		自然長
		質点
		質点系
		質量
		重心
		重心運動
		重心系
		自由度
		従法線ベクトル
		重量
		重力加速度
		主法線ベクトル
		【す】
		垂直抗力
		ストークスの定理
		ストークスの法則
		すべりなしの条件
		ずれ弾性率
		【せ】
		静止摩擦係数
		静止摩擦力
		接線応力
		接線ベクトル
		線形齊次微分方程式
【か】		
回転	173	
回転運動	93	
ガウスの発散定理	173	
角運動量	105	
角加速度	50, 74	
角速度	50, 74	

線形非斉次微分方程式 175
 線形微分方程式 175
 せん断応力 127
 全微分 172

【そ】

相互作用 20
 相対運動 87
 層流 158
 速度 6
 速度空間 11, 13
 速度勾配 158
 塑性 53, 126
 塑性体 126

【た】

体積弾性率 128, 137
 弾性 53, 126
 弾性体 125

【ち】

力のモーメント 95
 縮まない流体 143
 縮む流体 143
 張力 127

【て】

定常流 149
 定数係数線形斉次微分方程式 176
 デカルト座標 11, 165

【と】

動粘性率 162
 等方的 128
 動摩擦係数 46
 動摩擦力 46
 特性方程式 176
 特別解 175
 特解 175
 トリチェリの法則 155

【に】

ニュートンの運動方程式 19

【ね】

粘性抵抗 163
 粘性率 159
 粘性力 149
 粘度 159

【は】

ハーゲン-ポアズイユの法則 159
 倍法線ベクトル 169
 パスカルの原理 146
 発散 173
 発散定理 173
 ばね定数 53
 ハミルトンの演算子 34, 173
 速さ 6

【ひ】

非圧縮性流体 143
 歪み 125, 131
 引っ張り応力 127
 ピトー管 157

【ふ】

フーコーの振り子の実験 80
 復元力 53
 フックの法則 53
 物理量 1
 浮力 148

【へ】

平均速度 8
 平均の速さ 8
 平行軸の定理 109
 並進運動 92, 96
 平面運動 119
 ベルヌーイの法則 153
 変位 6
 変位ベクトル 12
 変数分離形 174
 ベンチュリ管 156
 偏微分 172

【ほ】

ポアソン比 128
 方向余弦 181
 法線応力 127
 補助方程式 176
 保存力 34
 ポテンシャルエネルギー 34
 ホドグラフ 14

【ま】

マグヌス効果 164
 摩擦力 44

【み】

見かけの力 68

【や】

ヤング率 128, 130

【よ】

よどみ点 149

【ら】

乱流 158

【り】

力学的エネルギー 37
 力学的エネルギー保存則 29, 37
 理想流体 149
 流管 149
 流線 149
 流体 125, 143
 流体粒子 143

【れ】

レイノルズ数 161
 連続体 125
 連続方程式 150

【s】

SI単位 2

— 著者略歴 —

- 1989年 東京理科大学工学部物理学科卒業
1994年 東京理科大学大学院理工学研究科博士後期課程修了（物理学専攻）
博士（理学）
1995年 法政大学兼任講師
1999年 東京理科大学非常勤講師
2007年 日本工業大学非常勤講師
2009年 東京理科大学准教授
現在に至る

初学者のための 物理学 — 力学編 —

Physics for Beginners —A Part of Mechanics— © Eizo Uzu 2014

2014年3月7日 初版第1刷発行



検印省略

著者 宇 津 栄 三
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06632-6 (新井) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします