

物理入門コースについて

理工系の学生諸君にとって物理学は欠くことのできない基礎科目の1つである。諸君が理学系あるいは工学系のどんな専門へ将来進むにしても、その基礎は必ず物理学と深くかかわりあっているからである。専門の学習が忙しくなってからこのことに気づき、改めて物理学を自習しようと思っても、満足のゆく理解はなかなかえられないものである。やはり大学1~2年のうちに物理学の基本をしっかりと身につけておく必要がある。

その場合、第一に大切なのは、諸君の積極的な学習意欲である。しかしながら物理学の基本とは何であるか、それをどんな方法で習得すればよいかを諸君に教えてくれる良いガイドが必要なことも明らかである。この「物理入門コース」は、まさにそのようなガイドの役を果すべく企画・編集されたものであって、在来のテキストとはそうとう異なる編集方針がとられている。

物理学に関する重要な学科目のなかで、力学と電磁気学はすべての土台になるものであるため、多くの大学で早い時期に履修されている。しかし、たとえば流体力学は選択的に学ばれことが多いであろうし、学生諸君が自主的に学ぶのもよいと思われる。また、量子力学や相対性理論も大学2年程度の学力で読むことができるしっかりした参考書が望まれている。

編者はこのような観点から物理学の基本的な科目をえらんで、「物理入門コ

ース」を編纂した。このコースは『力学』、『解析力学』、『電磁気学 I, II』、『量子力学 I, II』、『熱・統計力学』、『弾性体と流体』、『相対性理論』および『物理のための数学』の8科目全10巻で構成されている。このすべてが大学の1, 2年の教科目に入っているわけではないが、各科目はそれぞれ独立に勉強でき、大学1年あるいは2年程度の学力で読めるようにかれている。

物理学のテキストには多数の公式や事実がならんでいることが多く、学生諸君は期末試験の直前にそれを丸暗記しようとするのが普通ではないだろうか。しかし、これでは物理学の基本を身につけるどころか、むしろ物理嫌いになるのが当然というべきである。このシリーズの読者にとっていちばん大切なことは、公式や事実の暗記ではなくて、ものごとの本筋をとらえる能力の習得であると私たちは考えているのである。

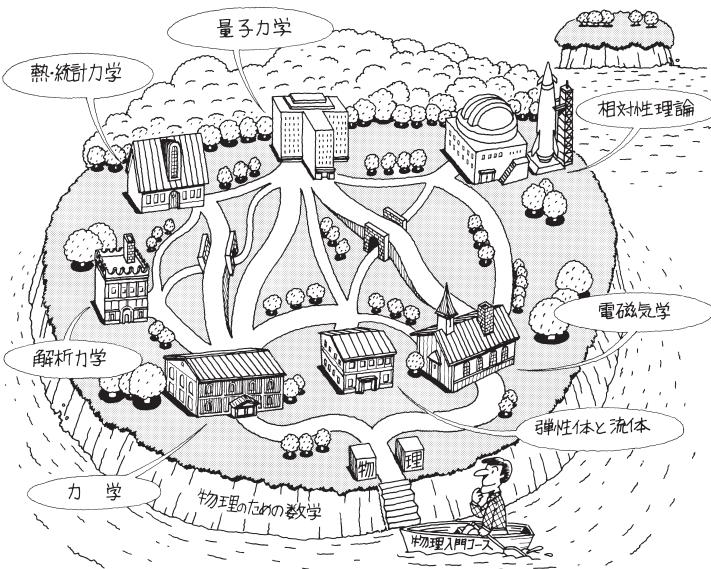
物理学は、ものごとのもとには少數の基本的な事実があり、それらが従う少數の基本的な法則があるにちがいないと考えて、これを求めてきた。こうして明らかにされた基本的な事実や法則は、ぜひとも諸君に理解してもらう必要がある。このような基礎的な理解のうえに立って、ものごとの本筋を諸君みずから努力でたぐってゆくのが「物理的に考える」という言葉の意味である。

物理学にかぎらず科学のどの分野も、ものごとの本筋を求めているにはちがいないけれども、物理学は比較的早くから発展し、基礎的な部分が煮つめられてきたので、1つのモデル・ケースと見なすことができる。したがって、「物理的に考える」能力を習得することは、将来物理学を専攻しようとする諸君にとってばかりでなく、他の分野へ進む諸君にとっても大きなプラスになるわけである。

物理学の基礎的な概念には、時間、空間、力、圧力、熱、温度、光などのように、日常生活で何気なく使っているものが少なくない。日常わかったつもりで使っているこれらの概念にも、物理学は改めてややこしい定義をあたえ基本的な法則との関係をつける。このわずらわしさが、学生諸君を物理嫌いにするもう1つの原因であろう。しかし、基本的な事実と法則にもとづいてものごとの本筋をとらえようとするなら、たとえ日常的・感覚的にはわかりきったこと

であっても、いちいちその実験的根拠を明らかにし、基本法則との関係を問い合わせることが必要である。まして私たちの日常体験を超えた世界——たとえば原子内部——を扱う場合には、常識や直観と一見矛盾するような新しい概念さえ必要になる。物理学は実験と観測によって私たちの経験的世界をたえず拡大してゆくから、これにあわせてむしろ常識や直観の方を改変することが必要なのである。

このように、のごとを「物理的に考える」ことは、けっして安易な作業ではないが、しかし、正しい方法をもってすれば習得が可能なのである。本コースの執筆者の先生方には、とり上げる素材をできるだけしづらり、とり上げた内容はできるだけ入りやすく、わかりやすく叙述するようにお願いした。読者諸君は著者と一緒にになってごとの本筋を追っていただきたい。そのことを通じておのずから「物理的に考える」能力を習得できるはずである。各巻は比較的に小冊子であるが、他の本を参照することなく読めるように書かれていて、



決して単なる物理学のダイジェストではない。ぜひ熟読してほしい。

すでに述べたように、各科目は一応独立に読めるように配慮してあるから、必要に応じてどちらから読んでもよい。しかし、一応の道しるべとして、相互関係をイラストの形で示しておく。

絵の手前から奥へ進む太い道は、一応オーソドックスとおもわれる進路を示している。細い道は関連する巻として併読するとよいことを意味する。たとえば、『弾性体と流体』は弾性体力学と流体力学を現代風にまとめた巻であるが、『電磁気学』における場の概念と関連があり、場の古典論として『相対性理論』と対比してみるとよいし、同じ巻の波動を論じた部分は『量子力学』の理解にも役立つ。また、どの巻も数学にふりまわされて物理を見失うことがないよう配慮しているが、『物理のための数学』の併読は極めて有益である。

この「物理入門コース」をまとめるにあたって、編者は全巻の原稿を読み、執筆者に種々注文をつけて再三改稿をお願いしたこともある。また、執筆者相互の意見、岩波書店編集部から絶えず示された見解も活用させていただいた。今後は読者諸君の意見もききながらなおいっそう改良を加えていきたい。

1982年8月

編者 戸田盛和

中嶋貞雄

「物理入門コース／演習」シリーズについて

このコースをさらによく理解していただくために、姉妹篇として「演習」シリーズを編集した。

- | | |
|--------------|----------------|
| 1. 例解 力学演習 | 4. 例解 熱・統計力学演習 |
| 2. 例解 電磁気学演習 | 5. 例解 物理数学演習 |
| 3. 例解 量子力学演習 | |

各巻ともこのコースの内容に沿って書かれており、わかりやすく、使いやすい演習書である。この演習シリーズによって、豊かな実力をつけられることを期待する。（1991年3月）

はじめに

連続体の力学すなわち流体や弾性体の力学は、われわれの周囲に展開する自然現象を理解するのに不可欠である。その基本的な体系は20世紀以前におよそととのえられたのであり、古典物理学の1つの成果である。20世紀になって量子論が誕生し、1930年頃までに量子力学が形成されると、物理学の主流は原子・分子あるいは原子核さらには素粒子といったミクロの世界を解明し、またその結果にもとづいて物質の構造や性質を理解する方向に向かった。そのため近年の物理学の教育でも量子物理学の方に自然と重点がおかれ、古典物理学に属する連続体の力学はやや脇役にまわされた感がある。しかし波動ひとつとっても見ても、弦の振動や音波、水の波などの身近かな題材でその物理を具体的に理解するのが望ましい。たとえばいきなり電磁波の放出を学ぶよりは、音波の放出から始める方がわかりやすい。量子力学で出てくる固有関数などの数学的道具立てについても同じことがいえる。

原子・分子あるいは原子核のレベルの物理学の体系がおよそととのった今日、乱流に代表されるような非線形現象の研究など、古典物理学の範囲の研究がきわめて活発になってきている。また連続体の力学が応用される舞台である地球物理学や宇宙物理学の研究が、めざましい発展を見せており、このようなことを考えあわせると、物理学を学ばれる諸君が早い段階で連続体の力学の基礎を

身につけるのは決して無駄ではない。

この本では流体と弾性体の力学の基本的な考え方と物理的内容の理解を目指したつもりである。そのかわり数学的な取り扱いはかなり省略あるいは簡単にすませることになった。たとえば完全流体の2次元流では複素関数論の美しい応用があるが、どの流体力学の本にも詳述してあるからここでは一切ふれなかった。また流体に比較的多くのページを使ったため、弾性体の力学を扱った第7章は大幅に圧縮しなければならず、基本的な枠組の説明に限ることにした。以上のような点については巻末にあげた参考書で‘さらに勉強’されることを望みたい。なお各節の‘問題’には具体例でいろいろな量がどれくらいの大きさであるかを求めるものが多い。‘感じ’をつかむためにぜひやってもらいたい。

この本を書くにあたって編者の戸田盛和、中嶋貞雄の両先生および京都大学理学部の巽友正先生からいろいろと御教示を頂いた。流れの可視化の研究の権威である九州大学応用力学研究所の種子田定俊先生は円柱のまわりの流れの写真を快く提供して下さった。ここで厚く感謝申し上げたい。また終始辛抱強く筆者の相談相手となって助力を惜しまれなかった岩波書店の片山宏海氏に心からお礼申し上げる。氏の熱意がなければこの本は陽の目を見なかつたであろう。最後に読者となってくれた研究室の田崎秀一、坪田誠の両君に感謝したい。とくに田崎君の注意深い検討のおかげで多くの誤りを訂正することができた。

1983年6月3日

恒 藤 敏 彦

目次

物理入門コースについて

はじめに

1	連続体の力学	1
2	弦と膜の力学	9
2-1	張力	10
2-2	弦の運動方程式	14
2-3	弦の振動——ダランベールの解	17
2-4	単色波, 固有振動	21
2-5	運動量とエネルギーの流れ	27
2-6	反射, 透過, 減衰	30
2-7	膜の弾性エネルギー	37
2-8	2次元の波動	42
3	完全流体の運動	51
3-1	流体にはたらく力	52
3-2	流れの記述	58

3-3	連続の方程式	63
3-4	オイラーの方程式	69
3-5	運動量の保存則	73
3-6	エネルギー保存則	75
3-7	循環のある流れ	78
3-8	ケルヴィンの渦定理	84
3-9	渦のない流れ	87
4	縮まない完全流体の流れ	93
4-1	縮まない流体の渦なし流	94
4-2	流れの例	96
4-3	球のまわりの流れ	101
4-4	円柱のまわりの流れ——揚力	107
4-5	渦のある流れ	113
4-6	渦糸モデル	115
4-7	渦糸運動の例	120
5	流体の波動	127
5-1	音波	128
5-2	音波のエネルギー	132
5-3	音波の一般的な取り扱い, 固有振動	136
5-4	音波の放出	141
5-5	円板による放出	147
5-6	反射と屈折	152
5-7	流れの効果, ドップラー効果	155
5-8	水面の波: 浅い場合	158
5-9	水面の波: 深い場合	163
5-10	群速度	168

6 粘性流体の流れ	173
6-1 粘性力	174
6-2 ナヴィエ-ストークス方程式	180
6-3 定常流の簡単な例	184
6-4 球のまわりのおそい流れとストークス抵抗	188
6-5 平板の振動による流れ	193
6-6 湧度の拡散	196
6-7 漪の成長	201
6-8 相似則とレイノルズ数	205
6-9 境界層, 乱れた流れ	209
7 弾性体	217
7-1 変形	218
7-2 歪みテンソル	220
7-3 応力テンソル	223
7-4 フックの法則	225
7-5 ポアソン比とヤング率	227
7-6 弾性体のなかを伝わる波	230
さらに勉強するために	235
問題略解	237
索引	247

コーヒー・ブレイク	
弦の振動とフーリエ分解	29
マクスウェルと流体力学	62
ヘルムホルツと流体力学	88
流体中の物体が受ける抵抗	92
カーブ	112
ケルヴィンの渦糸原子	119
超流体のなかの渦糸	124
波の形	162
レイノルズの実験	208
地球の振動	216

1

連續体の力学

われわれが日常観察するのは、固体であれ気体、液体であれ、すべて広がりをもつ物体の変形とともに運動である。それを支配するのはニュートン力学には違いないが、質点系の力学とは異なった形、すなわちこの本で学ぶ連続体の力学が必要となる。本論に入る前に、弾性体とか流体、あるいはそれらをひっくるめて連続体というとき、どんなものを意味するのかを明らかにしておこう。

ニュートン力学はケプラーの法則に象徴されるように天体の運動を焦点として形成された。惑星の運動を考えるとき、太陽と惑星の間の距離はそれらの大きさに比べてはるかに大きく、しかも太陽も惑星もほとんど球形であるから、質量をすべて重心に集めて大きさのない質点として取り扱ってもよい。すると太陽系は万有引力を及ぼしあう質点系となる。質点の運動は各瞬間でのその位置座標で記述されるから、天体を質点とみなすという一種の理想化によって、問題はきわめて簡単化されるわけである。

現実の太陽系に対してこの理想化は大変よい近似であるが、理想化であることには変わりがない。たとえば水星の運動には、ごくわずかではあるが、太陽が完全に球形でないことが影響する。また月の運動によって地球上の潮汐が生じ、それによって月が地球をまわる周期はわずかずつ長くなっていく。このような効果を問題にするときには、もちろん、太陽や地球を質点と考えるわけにはいかない。さらに、われわれの身近に生じる現象に目を移すと、どうしても質点の集まりとしては扱えない物体、すなわち広がりをもち、しかもその形を変える物体の運動を問題にしなければならない。ニュートン自身も空気や水の抵抗の問題や波動に深い関心をもち、『プリンキピア』の第2篇「物体の運動について——抵抗のある媒質中の」で詳しい議論を開いた。ニュートン以後の力学の発展は、まず広がりはあるが形を変えない剛体の力学、そしてさらに伸縮したり歪んだりする固体や、自由に形を変える空気や水の力学への一般化であった。この本で学ぶのは、弦や膜の振動、それがつくる音の伝搬、水の流れや波といった、日常経験する多くの現象を扱う力学である。

固体と流体 金属や氷のような固体は外から力を加えたとき、それに抵抗してもとの形をたもとうとする。それに反し、気体と液体は、たとえばプラスチックの袋に密封した空気や水をとってみればわかるように、体積の変化には抵抗するが、体積を変えないような変形はどんなに小さな力によっても生じる。したがって変形がどんどん進む、つまり「流れる」という現象が見られる。気体と液体とは密度の違い、圧縮のしやすさなど物理的な性質は異なるが、運動の仕方に関しては共通しているので、ふつう両者をひっくるめて流体(*fluid*)

とよぶ。

固体も流体もわれわれが普通に使う巨視的なスケールでは質点の集まりではなく、むしろ質量が連続的に分布した連続的な物体にみえる。質量の空間的な分布が連続的な、広がりのある物体のことを連続体(continuum)とよぶ。とくに流体や固体のなかを伝わる波などを考慮するとき、連続体を空間に充満している媒質とみなして連続媒質(continuous medium)ということもある。

ミクロの記述と連続体 現実の物体を連続体とみなすのは一種の理想化である。「質点」というのとはいわば反対の理想化といってもよい。われわれはどんな物体も原子(あるいはその構成要素である電子と原子核)からできていることを知っている。たとえば鉄の棒をとってみよう。微視的にはそれは鉄の原子が格子状に並んだ結晶の状態にある。一般に、原子間の相互作用のエネルギーは、原子が一定の並び方をしているときにもっとも低く、その並び方が熱運動でみだされていないのが固体である。隣り同士の原子間の距離は、鉄の場合約 2.5 \AA であり、ほかの固体でも大体このていどの値である。したがって 1 cm^3 のなかには約 10^{23} 個という莫大な数の原子があることになる。たとえばこれを波長がミクロン(10^{-4} cm)ていどの光で見ると、顕微鏡を使ってみようとしても、光学顕微鏡の分解能は波長で限られるため、なめらかな物体にしかみえない。高性能の電子顕微鏡で初めて原子の配列が識別できるのであって、巨視的にみると連続体にみえるというのはこの意味である。

外から固体に力を加えると固体は歪み、原子の並び方が変化する。そうするとともとにもどろうとする力が原子間にはたらき、変形がある大きさになると外力と釣り合う。原子間の相互作用がわかっていないれば、もとの結晶格子の並び方から原子の位置があるずれをしたとき、それに応じてどんな力が原子間にはたらくかを知ることができる。したがって鉄棒の変形や振動を、それをつくっている個々の原子にはたらく力の釣り合いやその運動として取り扱うことができる。しかしこのようなミクロの記述は必ずしも必要ではない。鉄の棒を押したり引っ張ったり、あるいは振動させたときに生じる変形は巨視的なスケールで生じているから、原子の並び方の変化も原子間の距離というミクロのスケール

でみると、きわめてゆっくりとした変化である。したがって鉄の棒を連続体として扱ってもいっこうに差し支えない。固体を連続体として扱うときその力学がどんな形になるかは、第7章で考察する。

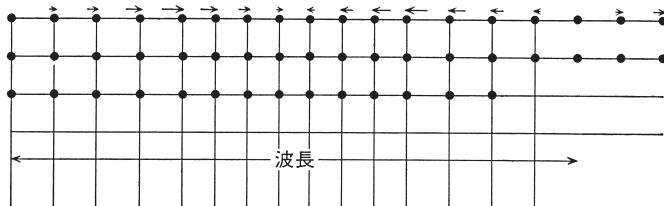


図 1-1 音波が伝わるとき、固体の原子は変位する。

連続体の近似がどのような場合に有効かを示すよい例は、固体のなかを伝わる音波である。音波にともなって原子は図 1-1 のような変位をする。この図からわかるように、変位は波長というスケールで変化する。図 1-2 は音波の振動数と波長の逆数(すなわち波数)との関係を示したもので、破線は連続体近似で求めた結果である。波長が原子間距離 α に近づくと、すなわち変形の仕方がミクロのスケールで生じるようになると、連続体近似は使えなくなる。逆に波長が原子間隔の 10 倍くらいになるとすでに近似がきわめてよいことがわかる。

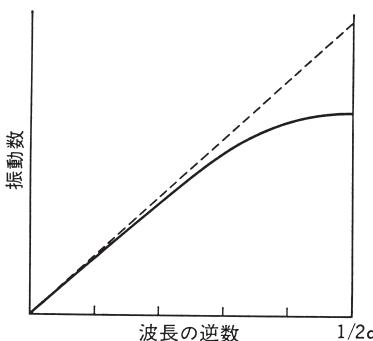


図 1-2 固体中を伝わる音波の振動数と波長の逆数の関係。

弾性体 固体でも外から加える力がある限界をこえると、その力を取り去ったときにもとの形にもどらなくなる。つまり永久変形をおこす。図 1-3 は鋼線を引っ張ったときの力の大きさと伸びとの関係を示したもので、矢印の点以上の力を加えると伸びが急に大きくなり、同時に永久変形が生じる。このよ

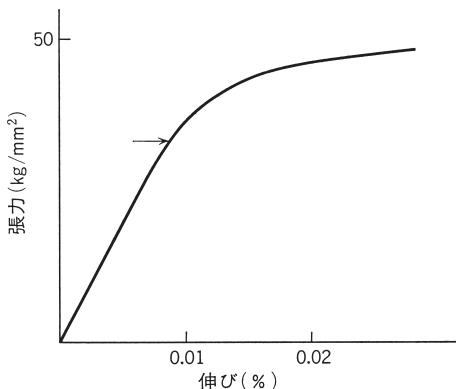


図 1-3 銅線を引っ張ったとき、矢印以上の力を加えると永久変形が起こる。

うな永久変形が起らぬ範囲での力学的な現象を扱うとき、固体を弾性体 (elastic body) とよぶ。第 7 章で考察するのは弾性体の力学だけである。

流体 この本の主な部分(第 3 ~ 第 6 章)では流体の力学を議論するが、流体の場合には連続体としての取り扱いがどうしても必要になる。液体では平均の原子間距離は固体とほぼ同じで数 Å ていどであり、気体でも標準状態(1 気圧, 0°C)では 1 cm^3 のなかに 10^{19} 個ていどの分子がある。気体や液体では、この莫大な数の原子あるいは分子は固体におけるように定まった位置を占めていないで、つねに乱雑な熱運動をしている。そのためにもはや個々の原子、分子の運動を追いかけるのは不可能であり、問題にできるのは平均的な量、すなわち密度、圧力、温度あるいは流れの速度といった量である。むしろこのような平均的な量こそわれわれの知りたいものである。したがって連続体として流体を考えるのはきわめて自然になってくる。

密度のような平均的な量が意味をもつためには、ある大きさの領域を考えなければならない。同様に、乱雑な運動によって平均化が生じるように、時間的にも少なくともある時間にわたって平均することが必要である。質量 m の分子の気体での密度 ρ は、ある体積 v のなかの分子の数を n とすると、 $\rho = mn/v$ で与えられる。体積 v を分子間の平均距離と同程度の大きさの領域とすると、

そのなかにある分子の数は激しくしかも乱雑に変化する量になってしまう。どのくらいの大きさにとればよいかという目安は、分子がたがいに衝突するまでに自由に運動する距離、すなわち平均自由行程とよばれる長さ l で与えられる。 l は液体では分子間の距離いどであり、標準状態の気体では 10^{-6} cm のいどである。これに比べて大きなスケールの領域で平均すれば密度とか圧力が意味をもつと考えてよい。また時間のスケールは衝突の間の時間で定められ、気体で 10^{-10} s のいどである。時間的にはこれよりはるかに長い時間で変化し、空間的には l より大きな距離にわたって変化するような巨視的な運動を扱う場合には、各瞬間に各点で値をもつ量として、密度や圧力を考えることができる。すなわち流体を連続体とみなすことができる。第3章で流体の微小な部分に注目し、その質量とかまわりの流体がそれに及ぼす力とかを考えるが、その微小部分の大きさは巨視的には微小であるが、ミクロには上に述べた意味で充分大きくてはならない。たとえば液体の中で花粉のように微小な粒子にはたらく力は、平均的な圧力によるものだけでなく、ゆらぎも重要になることは、ブラウン運動によく示されている。

場の力学 連続体の力学でのもっとも重要な点についてふれておこう。流体を例にとると、流体のある部分は、そのまわりにある流体と無関係に運動することはできない。ある部分が動くためにはまわりも動かなければならぬ。流体の各部分はいつもたがいに押し合いながら運動する。すなわち連続体では、ある部分はそれに接する部分と強い相互作用をして運動をする。いいかえると、連続体ではたらく力は近接作用の力である。(もちろん重力のような遠隔作用の力もはたらく。) このような力の作用のもとでどんな運動が起こるかを考察するわけである。

連続体は空間に広がった媒質とみることができる。その状態は空間の各点での密度、圧力、流れの速さなどの量で記述される。このように空間の各点で考える量を場の量とよぶ。連続体の運動方程式はこれらの場の量の変化を支配する方程式であり、その意味で連続体の力学は電磁場のような場の力学の原型であるといえる。歴史的にも電磁気学の形成には18, 19世紀に発展した弾性体や

流体の力学が大きな役割を演じたのであった。それはラプラス、ガウス、ストークスなど電磁気学でなじみ深い名前がここでもしばしば出てくることでうなづけるであろう。身近に観察できる流体や弾性体の運動は、電磁場の理論などで使われる保存則などの定式化やベクトル解析、偏微分方程式などの数学的な道具を、物理的な意味をつかみながら理解するのにはよい題材である。具体的な問題の取り扱いについても同じことがいえる。近接作用のはたらく媒質でのもっとも特徴的な運動は波動であるが、流体や弾性体での音波であっても、電磁場での電磁波や光であっても、波動の理論の基本は同じである。この本ではまず、もっとも簡単な弦や膜の波動の取り扱いから始める。

なお連続体の力学への入門であるこの本で取り上げるのは、断わるまでもなく基礎的な事柄に限られる。たとえば流体力学では、境界層や乱流についてはごく簡単にふれるだけであるし、また温度勾配があるときに生じる対流、さらに大気の流れや海流のように水の蒸発、凝結といった熱現象が本質的に関係する流れはまったく取り上げない。熱的な過程がかかわってくると流れの現象は大変豊富になることを注意しておこう。またこの本で扱う波動はすべて振幅が充分小さく、いわゆる線形近似が有効な場合に限られている。しかし振幅が有限であることが本質的な意味をもつ非線形現象のなかには、衝撃波や孤立波(ソリトン)といったきわめて興味深いものが数多くある。このような魅力のある領域にふみこむためにも、まず基本になる物理を理解しなければならない。

最後に、「流体」とも「弾性体」ともいえない、両方の性質を同時に示すような物質も多くあることを注意しておこう。ガムのような高分子物質でゴムと同じく弾むが、放って置くと流れるものはその一例である。また卵の白身は水のような流れ方はしない。いろいろな物質の変形を扱う分野はレオロジー(rheology)とよばれる。



2

弦と膜の力学

波動は光、音、電子の波などの例をあげるまでもなく、普遍的な運動の形である。波動について基本的な事柄を学ぶには弦楽器の弦あるいはドラムの膜がよい題材になる。ここではそれらを理想化して、張力だけしかはたらかない線あるいは面として取り扱う。弦や膜の運動方程式はどんな形になるのか？ その前に、張力とはどんな力だろうか？ その辺から議論を始めよう。

2-1 張力

弦楽器の弦のように自由にまがる細い糸を理想化して考えよう。太さは無視するが、質量は有限であるとする。このような弦の両端を力 F で引っ張ったとすると、弦のどの部分をとってもその両端は残りの部分から外側に向かう力 F を受ける(図 2-1)。この力を張力(tension)とよぶ。微視的にみると張力を伝えているのは分子間力であるが、ここではその機構を知ることは必要ではない。弦がピンと直線に張られていれば、任意の部分の両端にはたらく張力は逆向きで釣り合っている。このときの弦にそって x 軸をとろう。いま張力は一定にして、弦を xy 面上の滑らかな曲線

$$y = u(x) \quad (2.1)$$

の形にしたとする。この曲線の形をした溝にはめこんだと思えばよい(図 2-2)。この場合にも張力の大きさはどこでも一定の値 F であるが、それがはたらく方向は各点での接線にそって、つまりその点での弦の形を近似する直線にそってはたらく。接線は場所によって変化するから、張力だけでは釣り合わず、弦は溝に力を及ぼす。 $x_0 - 4x/2$ と $x_0 + 4x/2$ の間にある弦の微小な部分(これを簡単のため要素 Δx とよぶ)が溝の壁に及ぼす力を求めよう。

式(2.1)で表わされる曲線の x における接線と x 軸とのなす角を $\theta(x)$ とするとき、それは図 2-3 からわかるように



図 2-1 弦の両端を力 F で引っ張る。

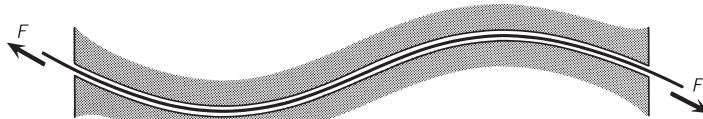


図 2-2 曲線溝に弦をはめて引っ張る。