

ISSE 物理

II. 波動・場の物理学

物理カリキュラム 2 年度

ISSE テキスト 編集部
copyright by Akira.TOKUNAGA

はじめに

物体だけでは自然は記述できない！

自然のドラマを、運動方程式というオペラグラスを通して眺めている限りでは、物体が主役、力はせいぜい相手役です。だが、そう思い込んでいるだけの観客は、第2幕目になって光が登場すると、ドラマの進行について行けなくなります。なぜならば、光のこのドラマでの活躍は誰の目から見てもかなり派手なものです。しかし、光はどう考えても物体ではない。すなわち、彼や彼女の思い込みでは決して主役にはなり得ないはずですから。

初歩的な力学では、力は2物体間を「瞬時に」伝達されるとして取り扱われました。ところが、伝達される力自体も時間の経過によったストリ-を持つことは、さまざまな自然現象の例を考えれば当然なのです。運動方程式というオペラグラスをはずして、波動方程式というオペラグラスにかけ代え、それを通して眺め直してみると、このドラマは、ただ一つの筋を追って行けば良いような、それほど単純なシナリオに基づいてそれぞれの役者が演じていた訳ではなかったことが見えて来ます。第2幕目で企てられていることは、主役の交替、力が主役、物体はワキ役への転換です。こうして、光とその仲間がその担い手である電磁気力が、初歩的な力学では質量が無視できる正に軽い存在であった弦が伝える張力も、あるいは、その伝達されたものが「音」と呼ばれて有名な、空気などが伝えている圧力も、その折々の主人公として顔をだす訳です。

ところが、これらのことを理解するのを妨げるような、困った事情がここにあるのです。それは、ごく簡単に「かけ代えろ。」と言ったオペラグラスである波動方程式が、高校で習う数学の範囲では、手に余るしろものなのです。しかし、数学的準備がまだできていないからといって、光や音のような重要な物理現象を抜かす訳には行きません。この単元を始めるにあたって、著者たちは、この段階で波動を習う皆さんに、すべての話を出発点に位置する波動方程式という強力な道具なしに進めているのだということを、まず初めに知らせておくべきだと思っています。何故かと言うと、科学を学ぶためには今やっている事のほんの少し先を予測しておくということも、なかなか大事だからです。そうしなければ、科学の勉強が意味のない記憶や訳の分からない操作を押し付けられているように思えてしまうでしょう。波動についての説明を、ともすれば実体の希薄な形式論と見てしまわないようにくれぐれも注意しましょう。この単元では、次善の策として、「波動についての運動学」から入って行きます。この「運動学」という言い方は、従来はまだ運動方程式を習っていない段階で、粒子についての取り扱いに関する数学的な内容を指す用語です。

運動学では、運動を起こす原因については問いません。粒子の運動学では、1点に位置する小さな物体の運動について時刻 t を変数とする式を用いて考察しました。^(*)運動の形態によって、粒子の位置、速度、加速度は、 t に関するさまざまな関数関係を持っていました。

この単元では、まず「波は何を伝えるか。」を明らかにした上で、波を表すのにどのような数学的表現が用いられるかを学ぶことが出発点となっています。しかし、これはまだまだほんの入り口であって、そのまた奥があります。この単元の後半では「力の場」という考え方を導入します。この部分は、なかなか本格的な議論まで到達しないことから、この場についての話を、早飲み込みをして、単なるひとつの表示法だと思ってしまうことは大きな誤りです。アインシュタインの

^(*)等加速度運動まで、微積を使わない形で高1でやる予定。一般論は、高2の数学の導関数の応用で展開する。

言葉を借りるならば「場は、自分の腰かけている椅子と同様に実在のもの」であって、これなしでは物理学の世界を描き切ることはできません。

教師用チャート：偏微分方程式を習った後での波動論の展開

1° 波源のある場合の波動方程式：
$$\Delta\psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = f(r, t)$$

ψ は、力の場である場合も、スカラー・ないし、ベクトル・ポテンシャルである場合もある。
(スカラー・波以外の場合、 ψ はある成分である。)自由場の波動方程式は、 $f = 0$ であるが、それ以外の場合には、いろいろな相互作用を表す「付加条件」がこれに加わって来る。
(物質方程式、ゲージ不変性、etc.)

$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$ の場合は「ポテンシャル論」であり、電磁場以外ですべての項が $\neq 0$ の場合には「波動力学」となる。

2° 重ね合わせの原理： ψ_1, ψ_2 が波動方程式の解であれば、 $\psi_1 + \psi_2$ も波動方程式の解となることで保証されるが、方程式が線形性を破る形になれば、重ね合わせの原理は成り立たなくなる。

3° 初期条件による解の決定。初期値は ψ と $\frac{\partial \psi}{\partial t}$ を与える。

→ ホイヘンス(フレネル・キルヒホッフ)の原理：グリーン関数を用いた解に対応する。
→ 回折理論。光の直進性。

4° 境界条件による解の決定。固定端反射(ディリクレ条件に対応)、自由端反射(ノイマン条件に対応)

→ 定常波 → 固有振動。フーリエ展開。
→ さまざまな積分形(ガウスの法則、etc. エネルギー密度(解の一意性に対応。))

5° 分散式(c の λ 依存度の関係。)「依存度なし」: 正弦波の解「位相」

→ アイコナル方程式 → 「幾何光学」、スネルの屈折の法則、etc.

目次

1 波の運動学	5
1.1 波は何を伝えるか	5
調和振動	5
力の伝達	7
縦波と横波	11
1.2 波の位相	15
位相	15
振動数・波長	16
球面波と平面波	17
位相の速さ	18
位相のガウス平面表示	19
波の強度	20
1.3 ドップラ - 効果	22
座標変換	22
ドップラ - 効果タイプ 1	22
ドップラ - 効果タイプ 2	23
媒質の運動	24
1.3 光のドップラ - 効果	25
トレ - ニング A	28
トレ - ニング B	29
2 波動の原理	31
2.1 波の重ね合わせの原理	31
波の重ね合せの原理	31
干渉	35
うなり	37
定常波	39
2.2 ホイヘンスの原理	41
ホイヘンスの原理	41
回折	41
光の直進性	44
反射の法則	45
屈折の法則	50
光のスペクトル	56
トレ - ニング A	60
トレ - ニング B	61