

## 2 波動方程式

気象場の中では、振動しながら空間を伝播していくさまざまな波動がみられる。ここでは、このような波動の時間変化を数値モデルによって計算してみよう。

### 2. 1 波動方程式とは

弦の振動を考える。弦の変位  $f(x, t)$  の時間方向の2階微分つまり加速度は、変位の空間方向の2階微分に比例し、

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} f = \frac{S}{\rho} \frac{\partial^2}{\partial x^2} f$$

と書けることが知られている。ただし、 $S$ は張力、 $\rho$ は弦の線密度である。ここで、定数  $c$  を

$$c = \sqrt{\frac{S}{\rho}}$$

と定義すれば、上の方程式は、

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} f = c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} f \quad [1]$$

と表せる。この方程式も2階線形偏微分方程式であり、**双曲型**(hyperbolic type)とよばれる。このような方程式を**波動方程式**(wave equation)とよぶことがある。 $c$ は**位相速度**(phase velocity)を表す( $c > 0$ とする)。 $[1]$ は、

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + c \frac{\partial}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial}{\partial t} - c \frac{\partial}{\partial x} \right) f = 0$$

と書くことができるので、以下では、1階線形微分方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} f + c \frac{\partial}{\partial x} f = 0 \quad [2]$$

の解を考える。ここで、物理量  $f$  が周期的に変化すると仮定して、

$$f = \Re f'(x) e^{-i\omega t} \quad [3]$$

とおく。 $\omega$ は角振動数である。 $[2]$ に代入すると、

$$-i\omega f' + c \frac{d}{dx} f' = 0 \quad [4]$$

となる。

方程式 $[4]$ は、線形常微分方程式であり、同次(斉次)形で、かつ定数係数であるから、解を

$$f' = \hat{f} e^{ikx} \quad [5]$$

とおく。ただし、 $\hat{f}$ は定数である。このとき、特性方程式は

$$-i\omega + ick = 0 \quad [6]$$

となる。特性方程式を解くと、

$$\omega = ck \quad [7]$$

が得られる。[5]、[7]を[3]に代入して、

$$f = \Re \hat{f} e^{ik(x-ct)} \quad [8]$$

となる。[8]において、一般に、

$$f(x+c\Delta t, t+\Delta t) = f(x, t)$$

が成り立つ。したがって、[8]は、位相速度  $+c$  で伝播する波動を表していると考えられる。なお、2階偏微分方程式[1]は、1次元空間を位相速度  $\pm c$  で伝播する波動を表している。

## 2. 2 波動方程式の差分化

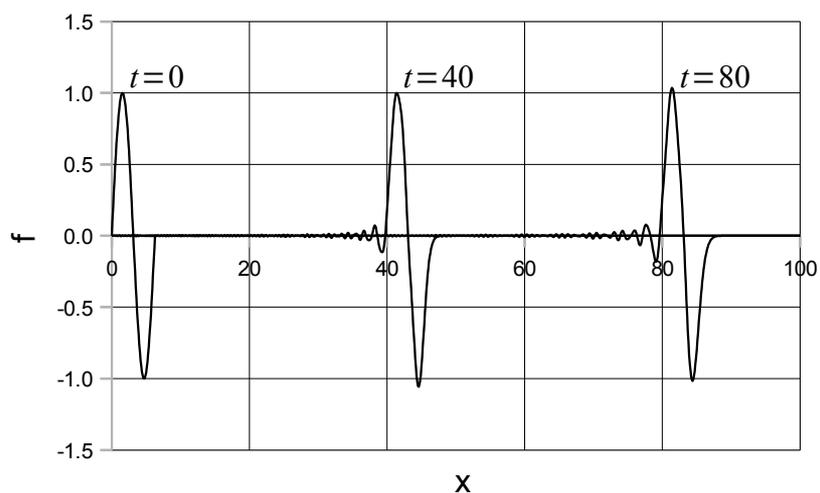
方程式[2]の解を数値積分（数値シミュレーション）によって求めることを考える。[2]が表す時間、空間微分を差分で表現すると、

$$\frac{f_{x=x_0}^+ - f_{x=x_0}^-}{2\Delta t} = -c \frac{f_{x=x_0+\Delta x}^0 - f_{x=x_0-\Delta x}^0}{2\Delta x} \quad [9]$$

と書きかえられる。 $f^0$  は物理量  $f$  の時刻  $t=t_0$  における値、 $f^-$  は時刻  $t=t_0-\Delta t$  における値、 $f^+$  は時刻  $t=t_0+\Delta t$  における値である。ここでは、対称性を考慮して、空間差分は  $x=x_0-\Delta x$  と  $x=x_0+\Delta x$  との間で計算している。このような空間差分を**中央差分**(central difference)という。なお、一般には、上流からの影響が重要であると考えて、各格子点の流速の値を参照して、その格子点と上流側で隣接する格子点との間で差分を計算する**上流差分**(upstream difference)という方法もある。また、時間差分は  $t=t_0-\Delta t$  と  $t=t_0+\Delta t$  との間で計算している。[9]を変形すると、

$$f_{x=x_0}^+ = f_{x=x_0}^- - c \frac{f_{x=x_0+\Delta x}^0 - f_{x=x_0-\Delta x}^0}{2\Delta x} (2\Delta t) \quad [10]$$

となる。[10]を用いれば、ある時刻  $t=t_0$  と前の時刻  $t=t_0-\Delta t$  における  $f$  の分布から、次の時刻  $t=t_0+\Delta t$  における  $f$  の分布を求めることができる。[10]のように、ある時刻の前の時刻における物理量の値と、その時刻における物理量の時間微分の値から、次の時刻における物理量の値を求める時間積分の方法を**リープfrog法**(leap-frog method)という。



波動方程式の数値解の例

**課題2** 波動方程式[2]の数値解を求めよ。空間差分としては中央差分、時間積分としてはリープフロッグ法を用いよ。ただし、 $c=1$ とする。格子間隔は $\Delta x=0.1$ 、計算領域は $x=0$ から $x=100$ まで、時間間隔は $\Delta t=0.05$ 、計算時間は $t=0$ から $t=80$ までとする。また、初期条件は

$$f(x)=\sin x \quad (0 \leq x \leq 2\pi)$$

$$f(x)=0 \quad (2\pi < x)$$

とし、境界条件は $f=0$  ( $x=0$ 、 $x=100$ )とする。計算結果は、 $t=0$ 、 $t=40$ 、 $t=80$ における $f(x)$ を1枚の図に重ねて作図して示せ。計算に用いたプログラム(report02.fまたはreport02.c)と図(report02.ps)を提出せよ。

## 補遺 2 階線形偏微分方程式の分類

楕円、放物線、双曲線はそれぞれ

$$x^2 + y^2 = 0$$

としたものも同様である。ラプラシアンを

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

と定義して、

$$\nabla^2 f = 0$$

と書くことができる。これにならって、2 階線形偏微分方程式を**楕円型**(elliptic type)、**放物型**、**双曲型**の3つに分類することがある。まず、

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f = 0 \quad [1]$$

のような偏微分方程式を楕円型という。代表例として、**ラプラス方程式**(Laplace's equation)が挙げられる。3次元空間で

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f + \frac{\partial^2}{\partial z^2} f = 0$$

としたものも同様である。ラプラシアンを

$$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

と定義して、

$$\Delta f = 0$$

と書くこともできる。また、ラプラス方程式の右辺に既知の関数を与えて、

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f + \frac{\partial^2}{\partial y^2} f = g$$

としたものは、**ポアソン方程式**(Poisson's equation)とよばれる。

さらに、

$$\frac{\partial}{\partial y} f - \frac{\partial^2}{\partial x^2} f = 0 \quad [2]$$

のような偏微分方程式を放物型という。代表例として、熱伝導方程式が挙げられる。また、

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f - \frac{\partial^2}{\partial y^2} f = 0 \quad [3]$$

のような偏微分方程式を双曲型という。代表例として、波動方程式が挙げられる。