4.1 スカラーの勾配

座標 x, y, z の関数 $f = f(x, y, z)$ が与えられた場合, 点 (x, y, z) における f の**勾配** (gradient) は以下のように定義される.

$$\text{grad}\ f \equiv \frac{\partial f}{\partial x}\boldsymbol{e}_x + \frac{\partial f}{\partial y}\boldsymbol{e}_y + \frac{\partial f}{\partial z}\boldsymbol{e}_z. \tag{4.1}$$

ここで $\boldsymbol{e}_i$ は i 方向の単位ベクトルである. grad はグラジュエント, もしくはグラッドと発音する. (4.1) はハミルトンの演算子

$$\nabla \equiv \boldsymbol{e}_x\frac{\partial}{\partial x} + \boldsymbol{e}_y\frac{\partial}{\partial y} + \boldsymbol{e}_z\frac{\partial}{\partial z}$$

を用いると

$$\text{grad}\ f = \nabla f$$

と表される.

(1) 固定点 P から一定の微小距離 dr だけ離れた点 Q がある. 点 P から Q へ移動した際の関数 f の変化が最大となるのは, ベクトル PQ が点 P における ∇f に平行な場合であることを示せ (ヒント: ベクトル PQ を $d\boldsymbol{r} = \boldsymbol{e}_x dx + \boldsymbol{e}_y dy + \boldsymbol{e}_z dz$ としてみよ).

(2) ∇f は $f =$ 一定 の面 (これを等位面と呼ぶ) に垂直であることを示せ.

(3) g を f とは異なるスカラー関数とする場合, 以下の式が成り立つことを示せ. ただし α, β はスカラーとする.

(i) $\nabla(\alpha f + \beta g) = \alpha\nabla f + \beta\nabla g$

(ii) $\nabla(fg) = g\nabla f + f\nabla g$

(iii) $\nabla\left(\dfrac{g}{f}\right) = \dfrac{f\nabla g - g\nabla f}{f^2}$

(iv) $\nabla f(g) = \dfrac{\partial f}{\partial g}\nabla g$

(4) 原点 O に対する点 P の位置ベクトルを $\boldsymbol{r}$, $|\boldsymbol{r}| = r$ とする. このとき以下の式が成り立つことを示せ. ただし $\boldsymbol{e}_r$ は $\boldsymbol{r}$ 方向の単位ベクトルとする.

(i) $\nabla r = \dfrac{\boldsymbol{r}}{r} = \boldsymbol{e}_r$

(ii) $\nabla\dfrac{1}{r} = -\dfrac{\boldsymbol{r}}{r^3} = -\dfrac{1}{r^2}\boldsymbol{e}_r$

(iii) $\nabla r^m = mr^{m-2}\boldsymbol{r} = mr^{m-1}\boldsymbol{e}_r$

4.2 ベクトルの発散

各成分が座標の関数となっているベクトル

$$\boldsymbol{A} = a_x(x,y,z)\boldsymbol{e}_x + a_y(x,y,z)\boldsymbol{e}_y + a_z(x,y,z)\boldsymbol{e}_z$$

を考える (このとき $\boldsymbol{A}$ をベクトル場と呼ぶ). $\boldsymbol{A}$ の**発散** (divergence, ダイバージェンス) は以下のように定義される.

$$\mathrm{div}\ \boldsymbol{A} \equiv \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}. \tag{4.2}$$

(1) $\varphi = \varphi(x,y,z)$ をスカラー関数とすると,

$$\mathrm{div} \cdot (\varphi \boldsymbol{A}) = (\mathrm{grad}\ \varphi) \cdot \boldsymbol{A} + \varphi \mathrm{div} \cdot \boldsymbol{A}$$

となることを示せ.

(2) スカラー関数 φ に対し,

$$\mathrm{div}\ (\mathrm{grad}\ \varphi) = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2}$$

となることを示せ.

div (grad φ) は $\nabla \cdot (\nabla \varphi), \nabla^2 \varphi$ 等とも表す. とくに ∇^2 を記号 Δ で表し, これをラプラス演算子と呼ぶ.

(3) 3 次元空間内の**定常な流れ**を考える. このとき空間内の各点の速度場は $\boldsymbol{v}(x,y,z)$ で与えられる. 流れ場中に空間内のある一点 P(x,y,z) を頂点にもち, 角辺が x,y,z 軸に平行でその長さが (dx,dy,dz) である微小直方体を置く. この直方体から単位時間に流出する流体の総体積は, 近似的に

$$(\mathrm{div}\ \boldsymbol{v})_{\mathrm{P}} \times dxdydz$$

と表されることを示せ. ここで $(\mathrm{div}\ \boldsymbol{v})_{\mathrm{P}}$ は点 P における $\boldsymbol{v}$ の発散を表す.