物理学基礎 I（医・医）第 8 回
仕事とエネルギー（2・3 次元） 後半

川﨑猛史

名古屋大学理学部物理学科

Last update：June 4, 2021

第 8 回講義資料目次

第 8 回講義資料目次

1. 講義のスケジュール

♣ スケジュール更新（6/4）

1. 4/16：第 1 回
2. 4/23：第 2 回 (第 1・2 回課題公開)
3. 4/30：第 3 回 (第 1・2 回課題提出期限)
4. 5/07：第 4 回 (第 3・4 回課題公開)
5. 5/14：第 5 回 (第 3・4 回課題提出期限)
6. 5/21：第 6 回 (第 5・6 回課題公開)
7. 5/28：第 7 回 (第 5・6 回課題提出期限)
8. **6/04：第 8 回 (第 7・8 回課題公開)**
9. 6/11：名大祭のため休講
10. 6/18：第 9 回 (**第 7・8 回課題提出期限**)
11. 6/25：第 10 回　(第 9・10 回課題公開)
12. 7/02：第 11 回 (**第 9・10 回課題提出期限**)
13. 7/09：第 12 回 (第 11・12 回課題公開)
14. 7/16：第 13 回 (**第 11・12 回課題提出期限**)
15. 7/17 補講日：第 14 回 (第 13・14 回課題公開)
16. 7/23：オリンピックのため休講
17. 7/30：**第 13・14 回課題提出期限**
18. 8/6（予定）：　期末試験

第 8 回講義資料目次

2. 今回の内容

♣ 本講義内容（期末試験範囲予定）[教科書 p31-p103(但し p93 以降はごく基本的な内容に限る)]

- 導入：物理学とは.
- 質点の運動学：質点の位置，速度，加速度の関係，ならびに，これらの微分（積分）による表現方法を学ぶ。特に，自由落下，斜方投射，等速円運動などを具体的に扱う。
- 運動の原因となる「力」を導入する.
- 「運動の３法則」(慣性の法則，運動方程式，作用・反作用の法則）を導入し，様々な運動を運動方程式を用いて普遍的に表現する.
- 質点の運動方程式の解法：運動方程式を様々なタイプの微分方程式に落とし込み，これらを具体的に解く。特に，減衰運動，単振動，減衰振動，強制振動などを扱う。
- **エネルギーとその保存則：仕事とエネルギーの関係を考察し，それらの具体的な問題を扱う.**
- 中心力運動：重力系を例に，中心力による質点の軌道を考察する.
- 相対運動と慣性力：座標変換と相対運動を扱い，慣性力を導入する.
- 多質点系の並進運動：重心運動と相対運動に分けて考える.
- 多質点系の回転運動：慣性モーメントの導入.
- 剛体の動力学：慣性モーメントを用いて回転する剛体運動の簡単な例を扱う.

第 8 回講義資料目次

3. 前回の補足：全微分

♣ 全微分

- 前回，位置エネルギー $U(\mathbf{r}) = U(x, y, z)$ の全微分
$\mathrm{d}U = U(x + \mathrm{d}x, y + \mathrm{d}y, z + \mathrm{d}z) - U(x, y, z)$ が

$$\boxed{\mathrm{d}U = \frac{\partial U}{\partial x}\mathrm{d}x + \frac{\partial U}{\partial y}\mathrm{d}y + \frac{\partial U}{\partial z}\mathrm{d}z} \tag{1}$$

となることを導入した．

- この全微分は，簡単のため $U(x, y)$ を例として，幾何的に以下の様に解釈可能である（図 **1**）．

3. 前回の補足：全微分 (2)

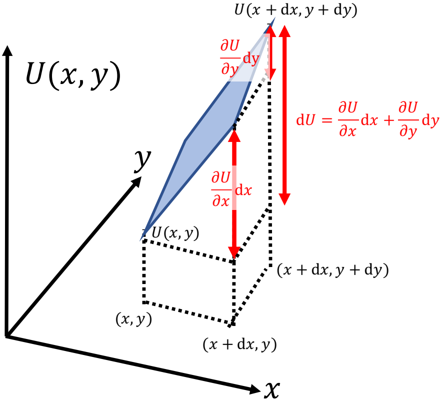


図 1: $\mathrm{d}U = U(x+\mathrm{d}x, y+\mathrm{d}y) - U(x,y)$ の幾何学的解釈.

第 8 回講義資料目次

4.1. 保存力が満たすべき巨視的性質

♣ 保存力が満たすべき性質 [講義オリジナル (関連:教科書 p51-p60)]

- ここでは，力 $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = (F_x(\mathbf{r}), F_y(\mathbf{r}), F_z(\mathbf{r}))$ が保存力である時の条件を考える．
- 保存力が仕事 W をした場合，始点と終点のみの位置座標で決まる．
- 始点と終点が等しい経路 C_1 と C_2 を考える（図 2A）．
- それぞれの経路で保存力が行なった仕事 W_1 と W_2 は等しいことから，

$$\int_{C_1} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{r} = \int_{C_2} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{r} \tag{2}$$

である．

4.1. 保存力が満たすべき巨視的性質 (2)

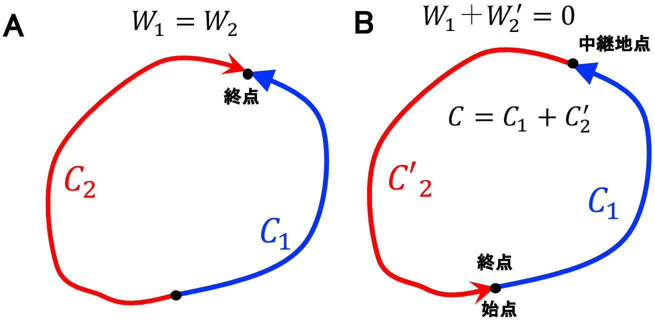


図 2: (A) 経路 C_1 と C_2. 力が保存力であるとき，それぞれの経路で行った仕事 W_1 と W_2 は等しい. (B) 経路 C_2 の向きを逆転させた経路 C_2' を導入. 保存力が，経路 C_1 と C_2' を合わせた周回経路 C で行った仕事は 0.

4.1. 保存力が満たすべき巨視的性質 (3)

- すると，式 (2) の右辺を左辺へ移項させることで

$$\int_{C_1} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} - \int_{C_2} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = 0 \tag{3}$$

$$\int_{C_1} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} + \int_{C_2'} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = 0 \tag{4}$$

  が得られる．ここで経路 C_2' は経路 C_2 の向きを逆転させた経路である（図 **2**B）．
- 式 (4) の積分は経路を一周して元の位置に戻ってくる積分であるので

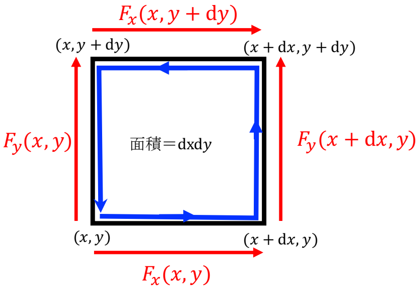
$$\boxed{\oint_{C} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{r} = 0} \tag{5}$$

  が得られる．ここで積分記号 $\oint$ は経路を一周させる線積分の意味で，周回積分と呼ばれる．
- 力が保存力であれば，**任意の経路で 1 周仕事をしたとき，仕事の総和が 0 になるという性質がある．**
- 上の性質を満たせば力が保存力であると言える．

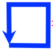
4.2. 保存力が満たす微視的性質

♣ 保存力が満たす微視的性質

- 力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ 保存力であるためには，任意の周回経路を一周仕事すると，仕事の総和が 0 になることを導入した．
- ここでは，保存力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が微小回路において周回仕事をすることを考える．
- 保存力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が満たす条件を求める．



仕事



$$
\begin{aligned}
&= F_x(x,y)\mathrm{d}x + F_y(x+\mathrm{d}x, y)\mathrm{d}y \\
&\quad - F_x(x, y+\mathrm{d}y)\mathrm{d}x - F_y(x,y)\mathrm{d}y \\
&= \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y}\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y
\end{aligned}
$$

図 3: 力が保存力であれば微小回路で行った仕事も 0.

4.2. 保存力が満たす微視的性質 (2)

- xy 平面上に敷いた任意の微小回路（図 3）を一周した時の仕事を dW_{xy} とすると

$$\begin{aligned}\mathrm{d}W_{xy} &= F_x(x,y)\mathrm{d}x + F_y(x+\mathrm{d}x,y)\mathrm{d}y - F_x(x,y+\mathrm{d}y)\mathrm{d}x - F_y(x,y)\mathrm{d}y \\ &= \{F_y(x+\mathrm{d}x,y) - F_y(x,y)\}\mathrm{d}y - \{(F_x(x,y+\mathrm{d}y) - F_x(x,y)\}\mathrm{d}x \\ &= \frac{F_y(x+\mathrm{d}x,y) - F_y(x,y)}{\mathrm{d}x}\mathrm{d}x\mathrm{d}y - \frac{F_x(x,y+\mathrm{d}y) - F_x(x,y)}{\mathrm{d}y}\mathrm{d}x\mathrm{d}y \\ &= \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y}\right)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \qquad (6)\end{aligned}$$

である．

- 力が保存力であるならば，任意の微小回路で行なった仕事も 0 になるので，

$$\boxed{\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} = 0} \qquad (7)$$

を満たす必要がある．

4.2. 保存力が満たす微視的性質 (3)

- 同様に，yz 平面，zx 平面に敷いた微小回路において行なった仕事も 0 であるので，

$$\boxed{\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} = 0} \tag{8}$$

$$\boxed{\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} = 0} \tag{9}$$

の全ての条件を満たす必要がある．

- **[教科書 p170(4) 参照]**　式 (7-9) は，ベクトル $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ の回転 (rotation) という量と関係しており，記号 rot を用いて，

$$\boxed{\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z}, \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x}, \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y}\right)} \tag{10}$$

と表される．

- つまり $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が保存力である為には，$\mathbf{F}(\mathbf{r})$ の回転が $\boxed{\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \mathbf{0}}$ である必要がある．

4.2. 保存力が満たす微視的性質 (4)

- ベクトルの $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ の回転はベクトル微分演算子ナブラ $\boldsymbol{\nabla}$ を用いて,

$$\boxed{\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{F}(\mathbf{r})} \tag{11}$$

  と書くことができる.
- 記号 $\times$ はベクトルの外積を表す.
- ベクトルの外積は，後日改めて扱うことにする．参考までに，ベクトル $\mathbf{F}$ の回転の憶え方を図 **4** に示した.

4.2. 保存力が満たす微視的性質 (5)

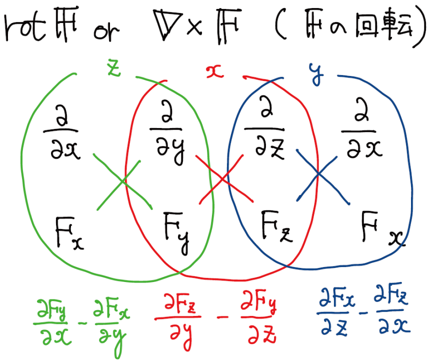


図 4: ベクトル $\mathbf{F}$ の回転の憶え方．上列 $\frac{\partial}{\partial x}$，$\frac{\partial}{\partial y}$，$\frac{\partial}{\partial z}$，$\frac{\partial}{\partial x}$，下列 F_x，F_y，F_z，F_x と並べて，中央，右，左の順に４つの変数を抜き出し斜めに掛け合わせたものを差し引きする．中央，右，左の順に，回転の x，y，z 成分となる．この規則は，ベクトルの外積一般において成り立つ．また，ナブラ ∇ はベクトルであるので，手書きで書く場合は二重線を入れる．

4.3. 微視的仕事と巨視的仕事の関係

♣ 微視的仕事と巨視的仕事の関係

- ここでは，先ほどとは逆に，保存力であることを仮定しない任意の力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ の回転が

$$\boxed{\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \mathbf{0}} \tag{12}$$

を満たす時，任意の巨視的な周回仕事：閉回路の積分が

$$\boxed{\oint_{\mathrm{C}} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{r} = 0} \tag{13}$$

を満たす，つまり $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が保存力であることを示す．（十分性の確認）

- 図 **5**A の様に，３次元空間中の閉回路 C を縁にもつ任意の表面を定義．
- 図 **5**B の様に，閉回路 C の表面は無数の xy，yz，zx 平面上の微小回路に分割可能（LEGO で作った立体をイメージ．ブロックが無限に小さければなめらか）．

4.3. 微視的仕事と巨視的仕事の関係 (2)

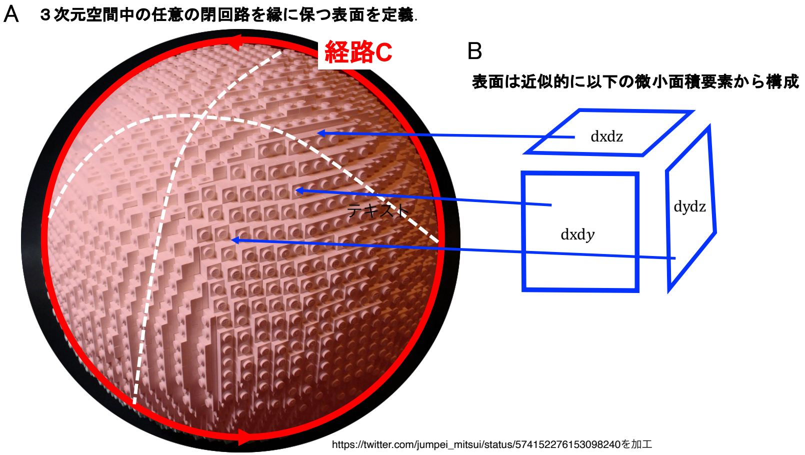


図 5: (**A**) 3次元空間中の閉回路 C を縁にもつ任意の表面を定義． (**B**) 閉回路 C の表面は無数の xy，yz，zx 平面上の微小回路に分割可能．

4.3. 微視的仕事と巨視的仕事の関係 (3)

- 図 **6** のように隣接する微小回路を抜き出し，それぞれで行った周回仕事の和を考える.
- 接している辺における仕事はそれぞれ逆向きであるので相殺する.
- 微小回路の周回仕事の総和は，領域の縁に沿って行なった仕事になる (図 **6**).

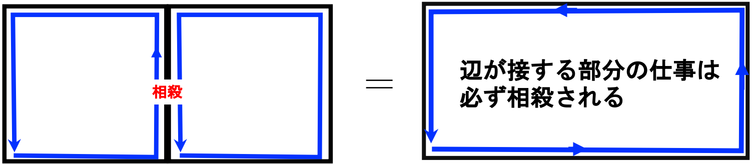


図 **6**: 微小回路を 2 つ並べたとき，接する辺で行った仕事は相殺する. 合計の仕事は領域の縁で行った仕事と等しい

- 微小回路が沢山隣接していても，周回仕事の総和は領域の縁に沿って行なった仕事になる.
- この性質を念頭におき，図 **5**A の領域 C 表面を構成するすべての微小回路で行った周回仕事の和 W を考える.

4.3. 微視的仕事と巨視的仕事の関係 (4)

- 微小回路の向きごとにまとめれば以下のようになる.

$$
\begin{aligned}
W &= \underbrace{\sum_i \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z}\right)_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_i} \mathrm{d}y\mathrm{d}z}_{yz\text{ 平面の微小回路での周回仕事和}} + \underbrace{\sum_j \left(\frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x}\right)_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_j} \mathrm{d}z\mathrm{d}x}_{xz\text{ 平面〃}} \\
&+ \underbrace{\sum_k \left(\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y}\right)_{\mathbf{r}=\mathbf{r}_k} \mathrm{d}x\mathrm{d}y}_{xy\text{ 平面〃}} \\
&= \sum_i (\mathrm{rot}\mathbf{F})_x \mathrm{d}y\mathrm{d}z + \sum_j (\mathrm{rot}\mathbf{F})_y \mathrm{d}x\mathrm{d}z + \sum_k (\mathrm{rot}\mathbf{F})_z \mathrm{d}x\mathrm{d}y \\
&= \sum_i \mathrm{rot}\mathbf{F} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \mathrm{d}y\mathrm{d}z \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{yz\text{ 平面の法線方向}} + \sum_j \mathrm{rot}\mathbf{F} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ \mathrm{d}x\mathrm{d}z \\ 0 \end{pmatrix}}_{xz\text{ 平面〃}} + \sum_k \mathrm{rot}\mathbf{F} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathrm{d}x\mathrm{d}y \end{pmatrix}}_{xy\text{ 平面〃}} \\
&= \iint \mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}(\mathbf{r})\mathrm{d}S \quad (\textstyle\iint\text{:面積積分,}\mathrm{d}S\text{:法線ベクトルと垂直な微小面積要素}) \\
&= \oint_{\mathrm{C}} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{r} \quad (\text{領域の縁を周回した仕事}) \qquad (14)
\end{aligned}
$$

4.3. 微視的仕事と巨視的仕事の関係 (5)

と表される．ここで，

$$\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \end{pmatrix}.$$

$$\mathbf{n}(\mathbf{r})\mathrm{d}S = \begin{pmatrix} \mathrm{d}y\mathrm{d}z \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0 \\ \mathrm{d}z\mathrm{d}x \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathrm{d}x\mathrm{d}y \end{pmatrix} \text{ のいずれか.}$$

である．

- この様に，$\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r})$ と，巨視的な仕事の関係がわかった．
- $\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r})$ の面積積分と $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ の周回積分が等しくなる数理構造を **Stokes の定理** という．

Stokes の定理

$$\iint \mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{n}\mathrm{d}S = \oint_{\mathrm{C}} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{r}$$

4.3. 微視的仕事と巨視的仕事の関係 (6)

- Stokes の定理より，$\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \mathbf{0}$ であれば $\oint_C \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot \mathrm{d}\mathbf{r} = \mathbf{0}$ である．
- よって，$\boxed{\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \mathbf{0} \text{ であれば } \mathbf{F} \text{ が保存力}}$であることが示された (十分性の確認).

[まとめ] 力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が保存力であることの必要十分条件

$$\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \mathbf{0}$$

4.4. 保存力の判定に関する例題

♣ ここでは，与えられた力が保存力か否かを判定する．もしその力が保存力の場合，それが行った仕事は経路に依らず始点と終点の座標にのみ依存することを確かめる．

例題： 物体の位置 $\mathbf{r} = (x, y, z)$ 座標に依存する力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = (-kx, -ky, -kz) \tag{15}$$

で与えられる時，次の各問に答えよ．ここで k は 0 を除く正の定数とする．（3 次元弾性力）

(1) 力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が保存力であることを示せ．

(2) 力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ に対応する位置エネルギー $U(\mathbf{r})$ を求めよ．但し基準点はどこにとってもよい．

(3) 原点 $\mathbf{0}$，終点を $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ とする，図 1 に示す経路 C に沿って力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が行った仕事を求めよ．

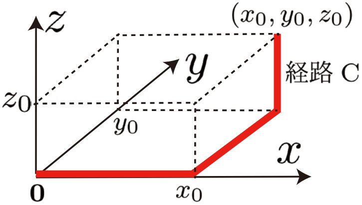


図 7: 本題における経路 C.

4.4. 保存力の判定に関する例題 (2)

(1) 「力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が保存力であることを示せ.」

- $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = (F_x, F_y, F_z)$ とするとき,

$$\begin{aligned}\frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} &= 0-0=0\\ \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} &= 0-0=0\\ \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} &= 0-0=0\end{aligned}$$

となるので，保存力の条件を満たす.

(2) 「力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ に対応する位置エネルギー $U(\mathbf{r})$ を求めよ．但し基準点はどこにとってもよい.」

- (1) より，$\mathbf{F}(\mathbf{r})$ は保存力であるので，位置エネルギーを

$$\boxed{U(\mathbf{r}) = -\int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{r}} \mathbf{F}(\mathbf{r}')\cdot \mathrm{d}\mathbf{r}'} \tag{16}$$

と定義.

- 積分経路はどの様に取っても構わないため，原点 $\mathbf{0}$ から $\mathbf{r}$ まで一直線に結んだ経路をとる.
- 経路上の点を $\boxed{\mathbf{r}' = t(x,y,z)}$ $(0 \le t \le 1)$ とおく.

4.4. 保存力の判定に関する例題 (3)

- ここで x, y, z は終点座標であるので定数の様に扱う．変数は t のみ．
- すると，$\boxed{\mathrm{d}\mathbf{r}' = (x, y, z)\mathrm{d}t\ ,\ \ \mathbf{F}(\mathbf{r}') = (-ktx, -kty, -ktz)}$.
- このことから $\boxed{\mathbf{F}(\mathbf{r}') \cdot \mathrm{d}\mathbf{r}' = -(ktx^2 + kty^2 + ktz^2)\mathrm{d}t}$

$$U(\mathbf{r}) = \int_0^1 (ktx^2 + kty^2 + ktz^2)\mathrm{d}t = k(x^2 + y^2 + z^2)\left[\frac{t^2}{2}\right]_0^1 = \boxed{\frac{k}{2}(x^2 + y^2 + z^2)} \tag{17}$$

が得られる．（3 次元系における弾性エネルギー．）

(3)　「原点 $\mathbf{0}$，終点を $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ とする，図 **1** に示す経路 C に沿って力 $\mathbf{F}(\mathbf{r})$ が行った仕事を求めよ．」

4.4. 保存力の判定に関する例題 (4)

- 経路 C における仕事を W とすると，

$$
\begin{aligned}
W &= \int_{\mathrm{C}} \mathbf{F}(\mathbf{r})\cdot \mathrm{d}\mathbf{r} \\
&= \underbrace{\int_0^{x_0} \begin{pmatrix} -kx \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathrm{d}x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{r}=(x,0,0)} + \underbrace{\int_0^{y_0} \begin{pmatrix} -kx_0 \\ -ky \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ \mathrm{d}y \\ 0 \end{pmatrix}}_{\mathbf{r}=(x_0,y,0)} \\
&+ \underbrace{\int_0^{z_0} \begin{pmatrix} -kx_0 \\ -ky_0 \\ -kz \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathrm{d}z \end{pmatrix}}_{\mathbf{r}=(x_0,y_0,z)} \\
&= \int_0^{x_0} (-kx)\mathrm{d}x + \int_0^{y_0} (-ky)\mathrm{d}y + \int_0^{z_0} (-kz)\mathrm{d}z \\
&= \frac{-k}{2}(x_0^2 + y_0^2 + z_0^2) \qquad (18)
\end{aligned}
$$

- 実際，$W = U(\mathbf{0}) - U(\mathbf{r}_0) = -U(\mathbf{r}_0)$ になっており，始点と終点のみで仕事がきまる保存力の性質を確かめることができた．

第 8 回講義資料目次

5.1. 第 8 回講義のまとめ

2・3 次元系における仕事とエネルギーの関係について考察した.

- 物体に掛かる力が「保存力」の場合，仕事は積分経路に依らない.
- 物体に掛かる力が「保存力」の場合,

$$\boxed{\mathrm{rot}\mathbf{F}(\mathbf{r}) = \mathbf{0}}$$

を満たす.

次回予告： 拘束力系における運動・仕事・エネルギー

5.2. 第７・８回レポート課題について

- 当科目 NUCT 内「課題」欄に、「第７・８回レポート課題」を用意しました．その中に，問題兼解答用紙をアップしましたので，各自印刷し，所定欄に解答の上，電子化した解答のスキャンを同ページ所定欄に添付してください．
- 解答用紙の印刷が諸事情により難しい場合は，通常のレポート用紙に解答してもよいこととします．
- 採点結果は，NUCT を通して各人へお知らせします．
- 添付ファイルは１つにまとめていることが望ましいです。
- ファイル名は 第７・８回レポート課題 (氏名).pdf と命名してください．
- スキャン方法の詳細は NUCT のフォーラムを参照ください。