医用工学概論

第2回　生体の性質1

前回の復習

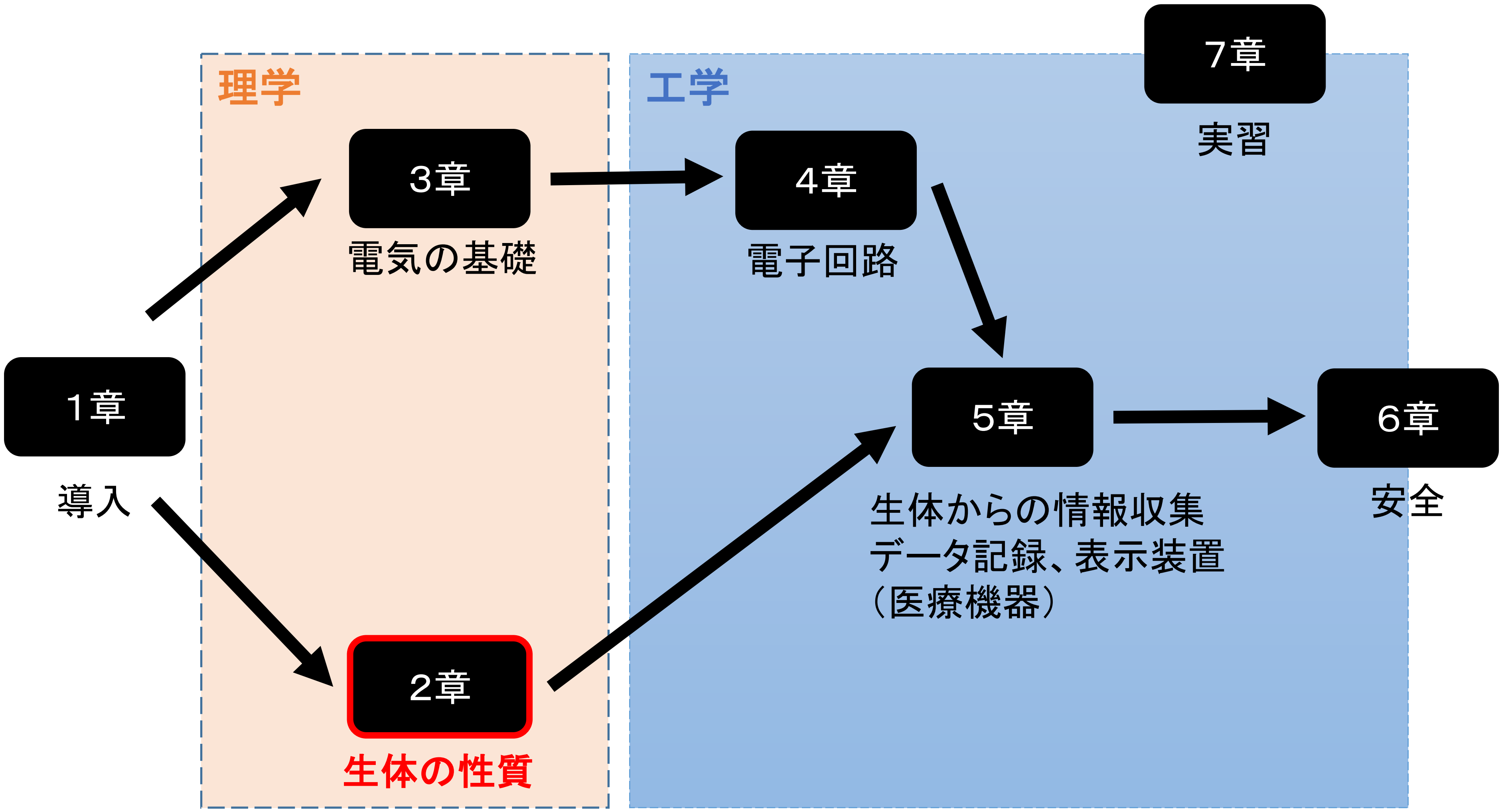
- 工学とは理学的な知識を社会に適用するための技術に関する学問
- 生体計測のもつ難しさは

経時変化・個体差の考慮および数量化の困難さ

である

- センサ（トランスデューサ）：生体信号を電気信号に変換
- 増幅・変調：微弱な信号を精密に検出

医用工学概論の章立て



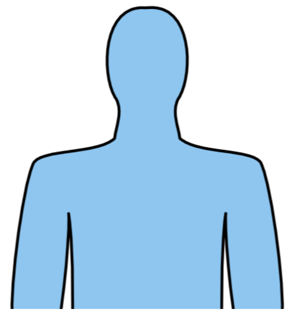
理学
工学
7章
実習
3章
電気の基礎
4章
電子回路
1章
導入
5章
生体からの情報収集
データ記録、表示装置
（医療機器）
6章
安全
2章
生体の性質

生体計測

電気的刺激
機械的刺激

入力

生体物性



出力

生体信号

生体信号がどのように得られるのかを知るためには
生体物性についての知識が必要

生体に作用するエネルギーと技術

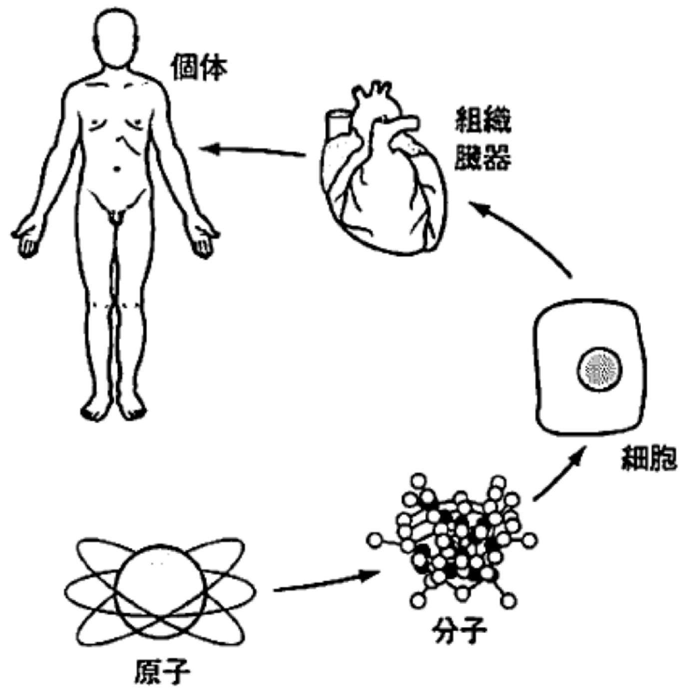
- 電気（低周波電流）
  生体電気計測、インピータンス計測、電気刺激、除細動装置
- 電磁界（高周波電流）
  MRI、医用テレメトリ、電気メス、ハイパーサーミア
- 機械的エネルギー
  血圧測定、各種圧力測定、人口関節、矯正技法
- 音波・超音波
  超音波装置、オージメトリ、心音計
- 熱
  サーモグラフィ、体温測定、ハイパーサーミア
- 光
  容積脈波形、パルスオキシメータ、眼科検査機器、光線療法
- 放射線
  X線CT、ポジトロンCT、ガンマカメラ、放射線治療

生体組織の特異的な性質

生体の物性値は条件によって異なる性質を示す。以下は生体物性に認められる固有の特異性である。

- 異方性
  測定される 方向 により物性値が異なる
- 非線形性
  入出力が 比例 の関係では表現できない性質
- 周波数依存性
  周波数 によって物性値が変化する性質
- 温度依存性
  温度 によって物性値が変化する性質
- 経時変化
  時間の経過 によって物性値が変化する性質

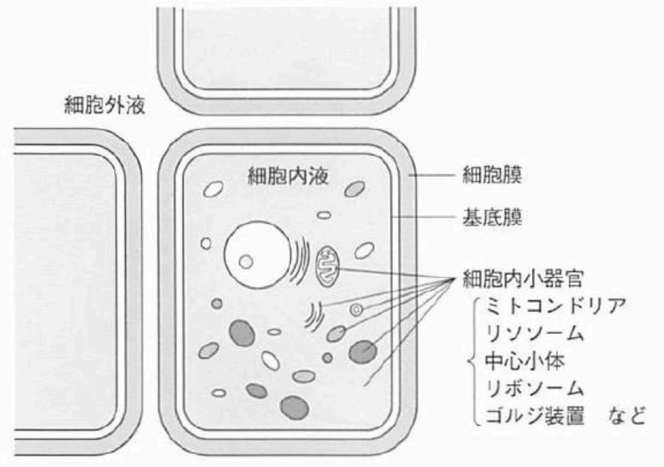
生体組織の構成



生体物性の階層性: エネルギー（入力）が生体のどの階層の 性質（生体物性）と関係するかを区別する必要がある.

細胞の構造

- 細胞膜
  脂質の膜に様々な機能を持った蛋白質（膜蛋白）が存在
- 細胞内液
  細胞膜の内側を満たす液体. 細胞内小器官が存在
- 基底膜
  細胞自身の構造を保っている.



教科書p10図２－２
「細胞の構造」参照

生体組織

上皮組織　体の外部と直接接触する部分　　例）皮膚，消化管，気道

→ エネルギーの防御壁として働く.

結合組織　組織，臓器をつなぐ部分

→ 体の動きや外力に対する変形に対し，
元の形状に復元する.

骨　体全体の構造の基となる部分
（他の組織とは物性が大きく異なる）

興奮性組織　筋や神経

→ 受動的な性質と能動的な性質がある.

電気的物性

レジスタンス（抵抗）	物体全体としての電流の流れにくさ [Ω オーム]
↓逆数	
コンダクタンス	物体全体としての電流の流れやすさ [S ジーメンス]
↓単位体積あたり	
導電率 σ（シグマ）	（物性としての）電流の流れやすさ [S/cm ジーメンス毎センチメートル]
誘電率 ε（イプシロン）	（物性）分極のしやすさ 静電気の貯まりやすさ
透磁率 μ（ミュー）	（物性）磁化のしやすさ

生体の受動的な電気物性

周波数依存性

周波数	100 Hz		10 kHz		10 MHz	
臓器・組織	導電率 σ (mS/cm)	比誘電率* ε	導電率 σ (mS/cm)	比誘電率* ε	導電率 σ (mS/cm)	比誘電率* ε
骨格筋	1.1	10^6	1.3	6×10^4	5	1×10^2
脂肪	0.1	10^6	0.3	2×10^4	0.5	4×10
肝臓	1.2	10^6	1.5	6×10^4	4	2×10^2
血液	5	10^6	5	1×10^4	20	1×10^2

*比誘電率は真空の誘電率に対する比

血液 は電流を最もよく通す（電解質が多く含まれる）

脂質 は電流を通しにくい

高周波ほど電流をよく通す

P11 表2-3

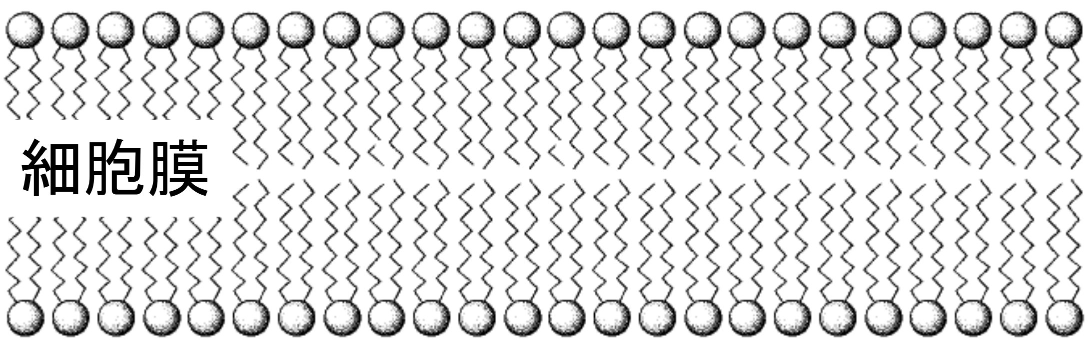
細胞の受動的な電気的性質

細胞外液・内液には電解質が多く、電流を　よく通す

リン脂質の細胞膜は電気を　通しにくい　薄膜なので、
コンデンサのように振る舞う

静止電位のとき細胞内は負の電位で、分極している状態

細胞外液　K^+ Na^+ Cl^-



細胞膜

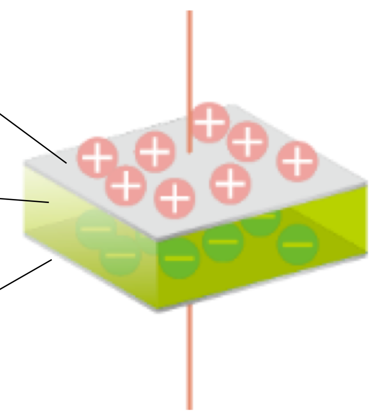
細胞内液　K^+ Na^+ Cl^-

コンデンサ　のように振る舞う

導体

絶縁体

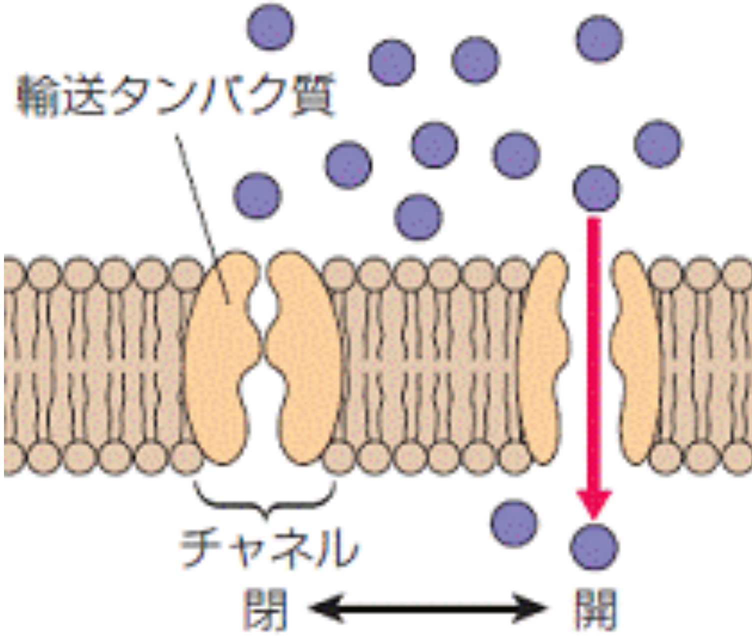
導体



興奮性細胞の能動的な電気的性質

- 細胞内は静止電位で分極している状態
- しきい値以上の電流が流れる
- Naチャネルが開き、Na^+が細胞内へ流入
- 細胞内の電位が上昇（脱分極）し、活動電位になる
- 元の電位に戻る（再分極）

心電図などの生体電気信号は
この電位の変化を記録する



電撃と生体物性

電撃　　体に流れた電流によって生体内の興奮性細胞が刺激を受けることで発生する.

マクロショック　電流が体表面から別の部分の体表に流れる

心室細動の閾値　100mA

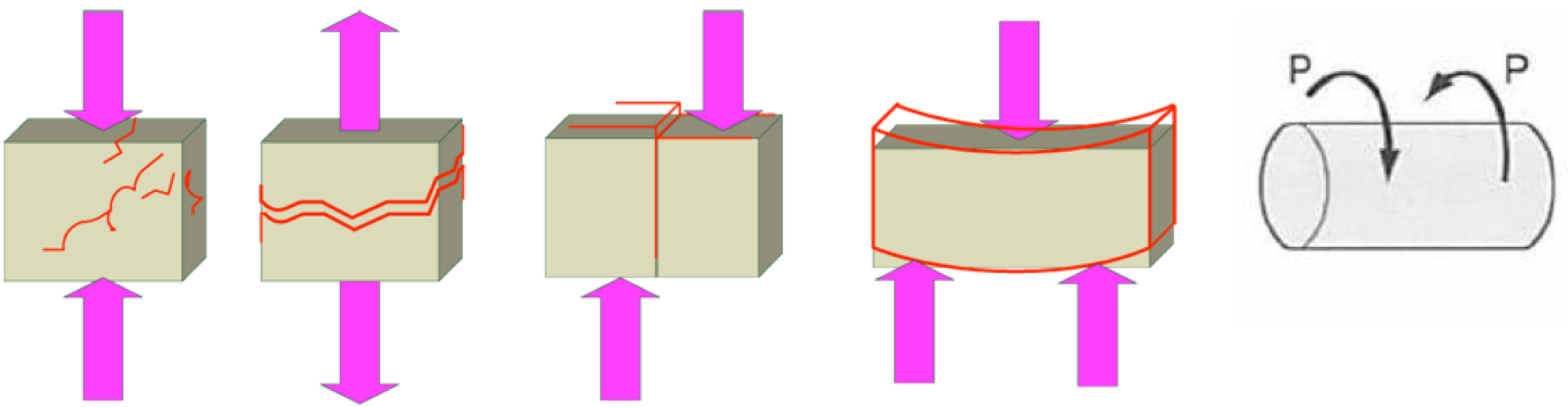
ミクロショック　電流が心臓に集中的に流れる

心室細動の閾値　100μA

ミクロショックはマクロショックに比べ，1,000倍の危険性がある.

機械的荷重の種類

せん
圧縮・引張荷重　　　剪断荷重　（曲げモーメント）（ねじりモーメント）

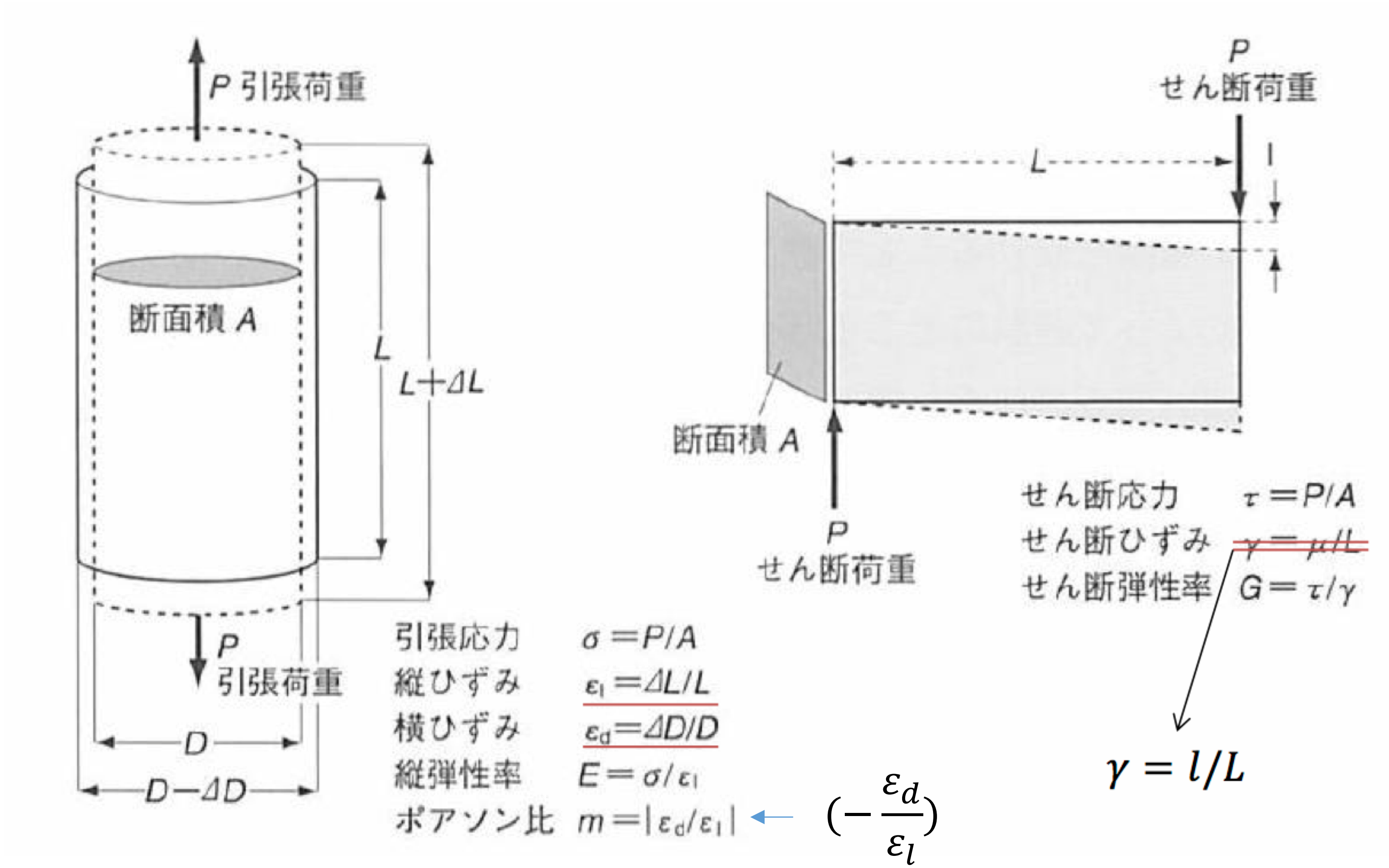


荷重 [N]　　外部から加わる力

応力 [Pa] = 荷重 [N] / 面積 [m^2]

荷重によって物体内部ではたらく力

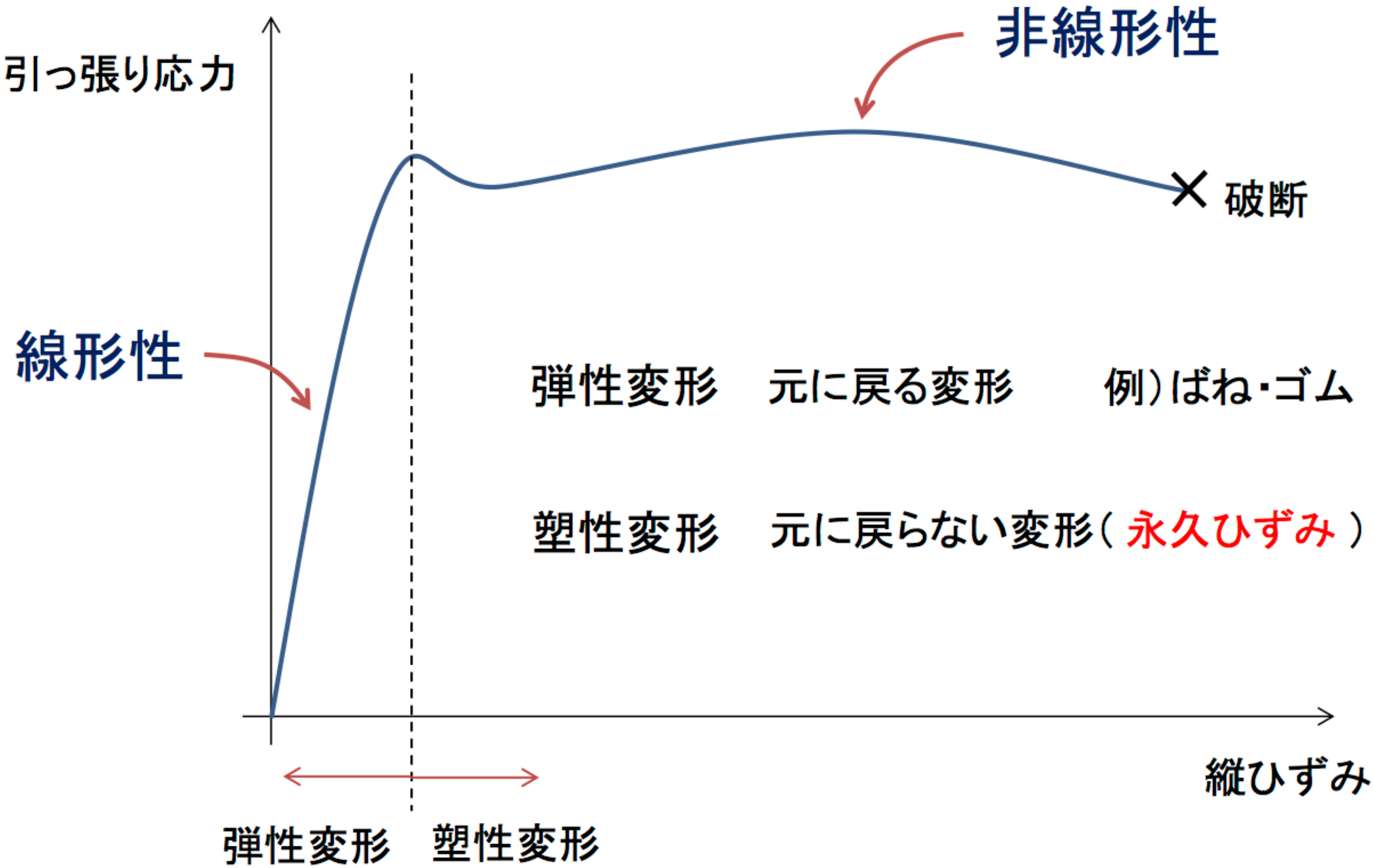
変形とひずみ



ひずみ　＝「変形した量/元の長さ」

P14 図2-5

応力ひずみ線図



非線形性
引っ張り応力
破断
線形性
弾性変形　元に戻る変形　例）ばね・ゴム
塑性変形　元に戻らない変形（ 永久ひずみ ）
縦ひずみ
弾性変形　塑性変形

弾性率

縦弾性係数　　引っ張り応力 σ と縦ひずみ ε_1 の比率

（ヤング率）

$$E = \sigma/\varepsilon_1 \ [\mathrm{N/m^2}]$$

変形のしにくさ（硬さ）の指標

横弾性率　　せん断応力 τ とせん断ひずみ γ の比率

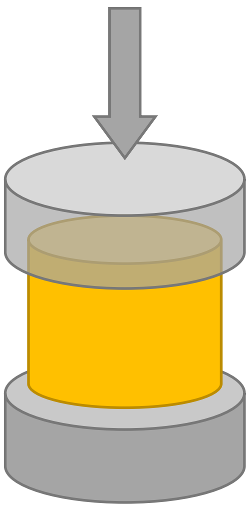
（せん断弾性率）

$$G = \tau/\gamma \ [\mathrm{N/m^2}]$$

ポアソン比　　横ひずみ ε_0 と縦ひずみ ε_1 の比率

$$m = \varepsilon_0/\varepsilon_1$$

異なるポアソン比の材質



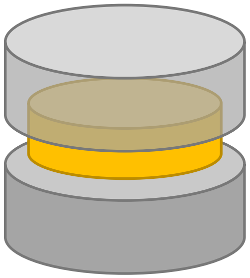
0.5

ゴム
皮膚

←非圧縮性物体

骨

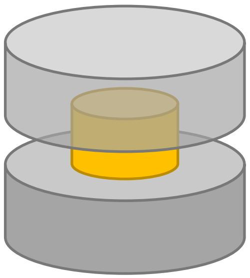
0



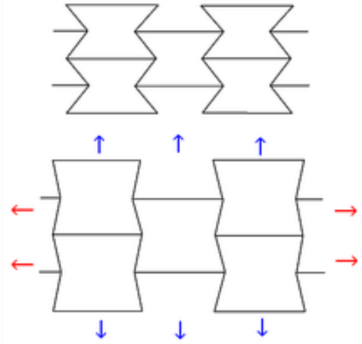
コルク

⋮

-1



（特殊構造）



生体物質の力学的物性

異方性

組織	荷重の様式	最大荷重(N/m²)	最大変形(%)	ヤング率(N/m²)
骨	圧縮荷重	1.5×10^8	2	0.8×10^{10}
腱	引張荷重	0.8×10^8	8	1×10^9
動脈	横方向引張荷重	2×10^6	100	2×10^6
筋	引張荷重	2×10^6	60	3×10^5
木材	圧縮荷重	1×10^8	2	1×10^{10}

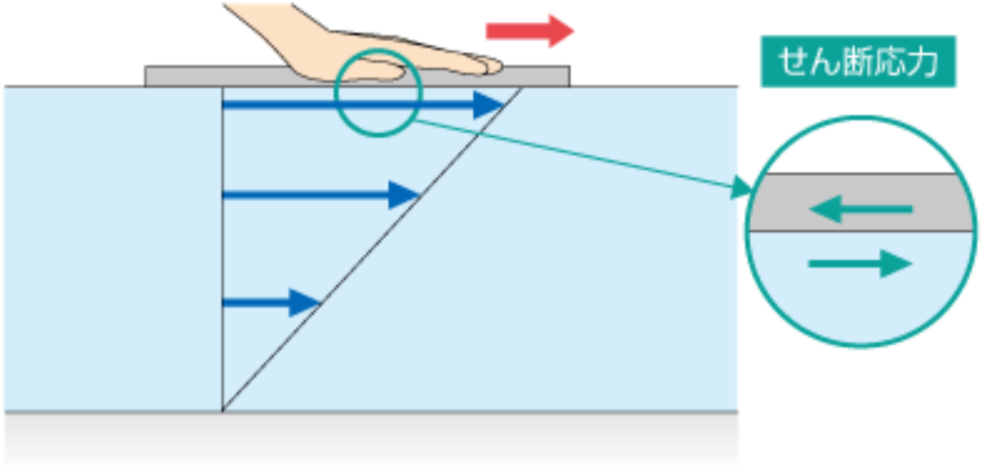
個体差 が大きく，同じ個体の同種の組織に対しても部位による差がある．

骨は，木材と同じくらいのヤング率(硬さ)を持つ．

P15 表2-4

粘性

流体中の摩擦により
流れに抵抗する性質



$$\gamma = \frac{\tau}{\mu}$$

γ せん断ひずみ速度 $[\mathrm{s}^{-1}]$
τ せん断応力 $[\mathrm{Pa}]$
μ 粘性率 $[\mathrm{Pa \cdot s}]$

ニュートン流体　　μ が一定（線形）
水、はちみつ

非ニュートン流体　　μ が応力 τ によって変化（非線形）
血液、ペンキ

粘弾性体　　粘性と弾性があり変形に時間がかかる

非ニュートン流体

ぎそせいりゅうたい
擬塑性流体
　流速が大きいほど粘度が低下
　　例: ケチャップ、マヨネーズ
ダイラタント流体
　流速が大きいほど粘度が増加
　　例: ウーブレック（水&片栗粉）
ビンガム流体
　一定の力が加わらないと流動しない
　　例: バター

血液

血漿:　ニュートン流体
血液:　非ニュートン流体

ふるまい
速度が小さいとき:　粘性係数が急激に上昇
速度が大きいとき:　粘性係数はほぼ一定

剪断速度大で、ニュートン流体に近似

問題1

生体組織に100Hzの電流が流れた時に、導電率（mS/cm）が最も大きいのはどれか

I. 肝臓
II. 血液
III. 骨格筋
IV. 脂肪
V. 頭蓋骨

問題1　解答

正解　Ⅱ. 血液

血液＞骨格筋,臓器＞脂肪＞骨

水分の量が影響する

教科書P11

問題2

生体組織を扱う上で問題となりにくい性質を２つ選べ

I. 線形性
II. 温度依存性
III. 周波数依存性
IV. 等方性
V. 経時変化

問題2　解答

正解: 線型性、 等方性

生体組織の性質は

I. 非線形性
II. 温度依存性
III. 周波数依存性
IV. 異方性
V. 経時変化

教科書P8-9

問題3

ミクロショックにおける心室細動の閾値はいくつか

I. 0.1 [mA]
II. 0.01 [mA]
III. 1 [mA]
IV. 10 [mA]
V. 100 [mA]

問題３　解答

正解: Ⅱ. 0.01 [mA]

ミクロショックにおける心室細動の閾値は

100 [μA] = 0.01[mA]

教科書p13

SI接頭辞

		1000^4	10^{12}	1 000 000 000 000
		1000^3	10^9	1 000 000 000
		1000^2	10^6	1 000 000
		1000^1	10^3	1 000
ヘクト (hecto)	h		10^2	100
デカ (deca)	da		10^1	10
		1000^0	10^0	1
デシ (deci)	d		10^{-1}	0.1
センチ (centi)	c		10^{-2}	0.01
		1000^{-1}	10^{-3}	0.001
		1000^{-2}	10^{-6}	0.000 001
		1000^{-3}	10^{-9}	0.000 000 001
		1000^{-4}	10^{-12}	0.000 000 000 001

SI接頭辞

テラ (tera)	T	1000^4	10^{12}	1 000 000 000 000
ギガ (giga)	G	1000^3	10^9	1 000 000 000
メガ (mega)	M	1000^2	10^6	1 000 000
キロ (kilo)	k	1000^1	10^3	1 000
ヘクト (hecto)	h		10^2	100
デカ (deca)	da		10^1	10
		1000^0	10^0	1
デシ (deci)	d		10^{-1}	0.1
センチ (centi)	c		10^{-2}	0.01
ミリ (milli)	m	1000^{-1}	10^{-3}	0.001
マイクロ (micro)	μ	1000^{-2}	10^{-6}	0.000 001
ナノ (nano)	n	1000^{-3}	10^{-9}	0.000 000 001
ピコ (pico)	p	1000^{-4}	10^{-12}	0.000 000 000 001

問題4

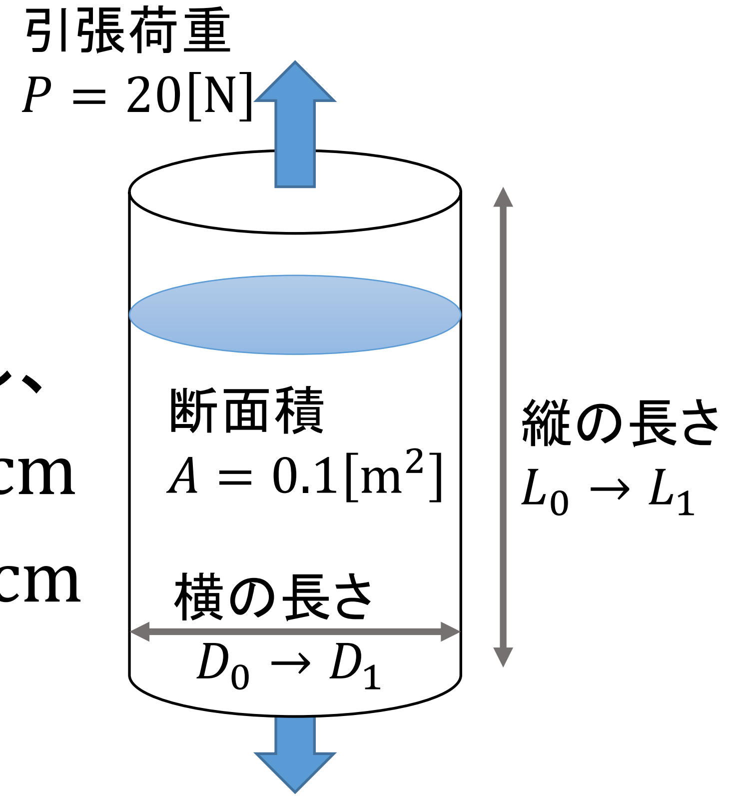
材料に引張荷重を加えると変形し、
縦の長さ $L_0 = 10\mathrm{cm} \rightarrow L_1 = 12\ \mathrm{cm}$
横の長さ $D_0 = 5\mathrm{cm} \rightarrow D_1 = \ 4.5\ \mathrm{cm}$
に変化した。

(1) 応力 σ を求めよ

(2) 縦変形量 $\varDelta L$ 横変形量 $\varDelta D$ を求めよ

(3) 縦ひずみ ε_l 横ひずみ ε_d を求めよ

(4) ポアソン比 m を求めよ



問題4　解答

（1）引張応力

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$= \frac{20}{0.1}$$

$$= 200\ [\mathrm{Pa}]$$

問題4　解答

(2) 縦変形量・横変形量

$$
\begin{aligned}
\mathit{\Delta} L &= L_1 - L_0 \\
&= 12 - 10 \\
&= 2\ [\mathrm{cm}]
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
\mathit{\Delta} D &= D_1 - D_0 \\
&= 4.5 - 5 \\
&= -0.5\ [\mathrm{cm}]
\end{aligned}
$$

問題4　解答

（3）縦ひずみ・横ひずみ

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$= \frac{2}{10}$$

$$= 0.2$$

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta D}{D_0}$$

$$= \frac{-0.5}{5}$$

$$= -0.1$$

問題4　解答

（4）ポアソン比

$$m = \left|\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_l}\right|$$

$$= \left|\frac{-0.1}{0.2}\right|$$

$$= 0.5$$

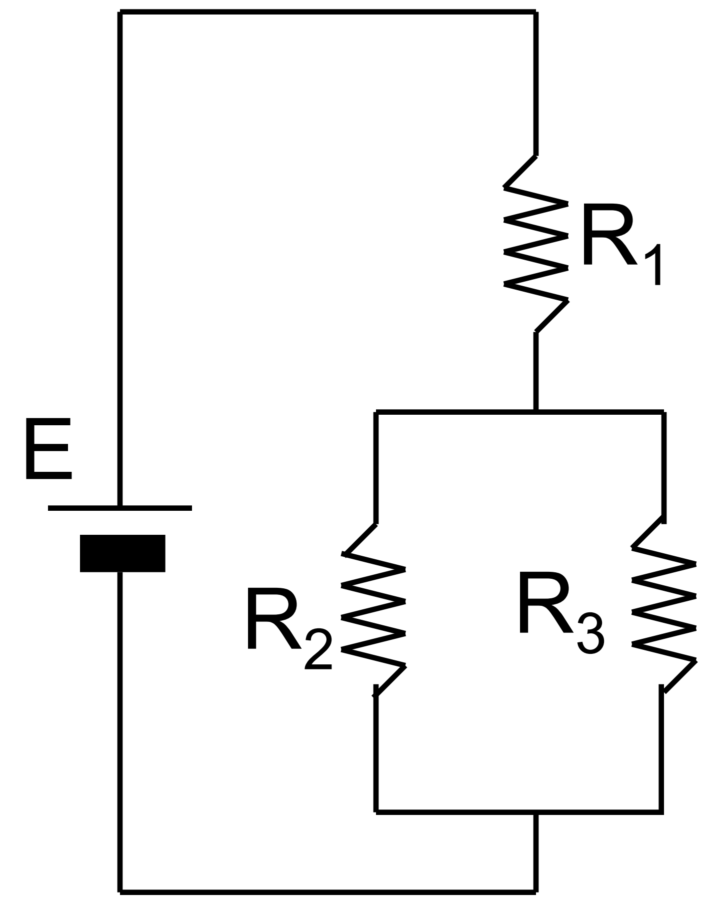
復習問題1

全体の合成抵抗Rを求めよ。

全体の電力Pを求めよ。

$R_1 = 20$, $R_2 = 10$, $R_3 = 10$ [Ω]

$E = 100$ [V]



復習問題1　解答

合成抵抗

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2+R_3} = \frac{10\times10}{10+10} = \frac{100}{20} = 5$$

$$R_{123} = R_1 + R_{23} = 20 + 5 = 25$$

<u>正解: 25 [Ω]</u>

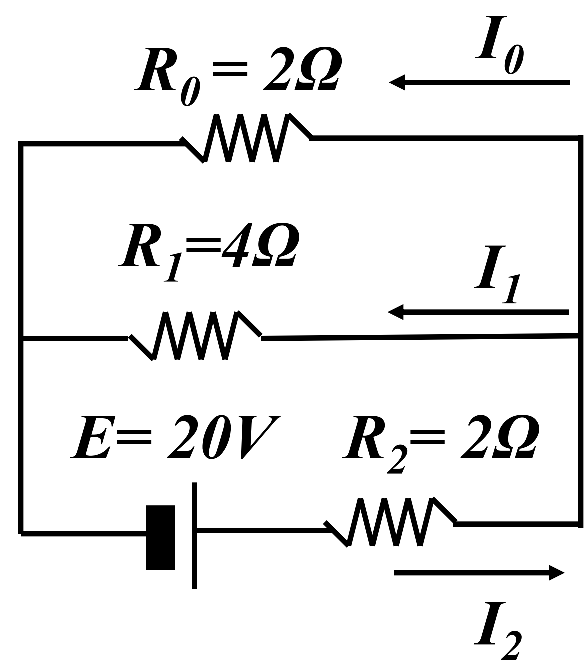
電力

$$P = VI = V\frac{V}{R} = \frac{V^2}{R} = \frac{100^2}{25} = \frac{10000}{25} = 400$$

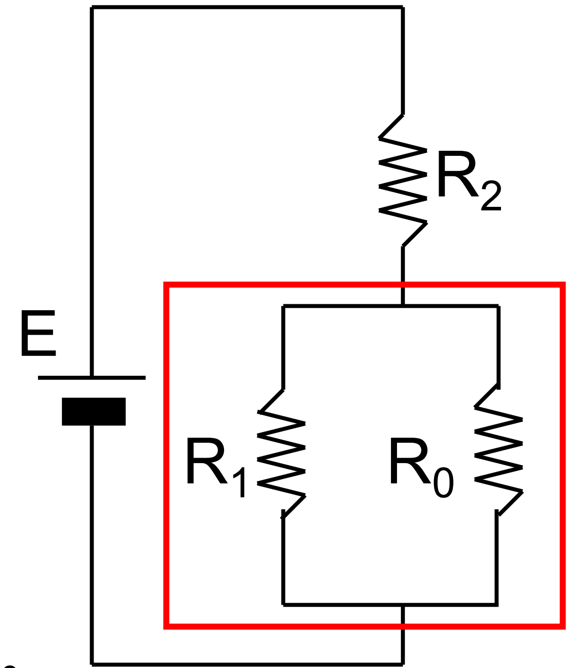
<u>正解: 400 [W]</u>

復習問題2

右図に示す回路において矢印のような電流が流れているとき抵抗R_0を流れる電流I_0は何(A)か？
ただし、内部抵抗は無視するものとする。



復習問題2　解答



右の等価回路で

I_0を求めるためにはオームの法則

$I_0 = V_0/R_0$

から、V_0が分かれば良い。

R_1とR_0は並列接続なので、以下の関係が成り立つ。

$V_0 = V_1$

赤線で囲った部分とR2は直列接続なので、次式が成り立つ。

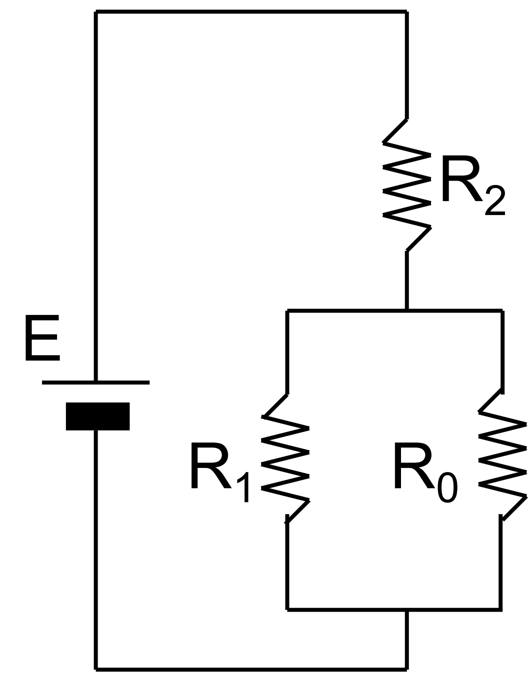
$V_0(=V_1)+V_2=E$　　->　　$V_0 = E - V_2$

V_2はオームの法則から、

$V_2 = R_2I_2$

で求められる。

復習問題2　解答



R_2を流れる電流I_2は回路全体を流れる
電流と等しいので、次式が成り立つ。

$I_2 = E/R_{012}$

回路全体の合成抵抗は

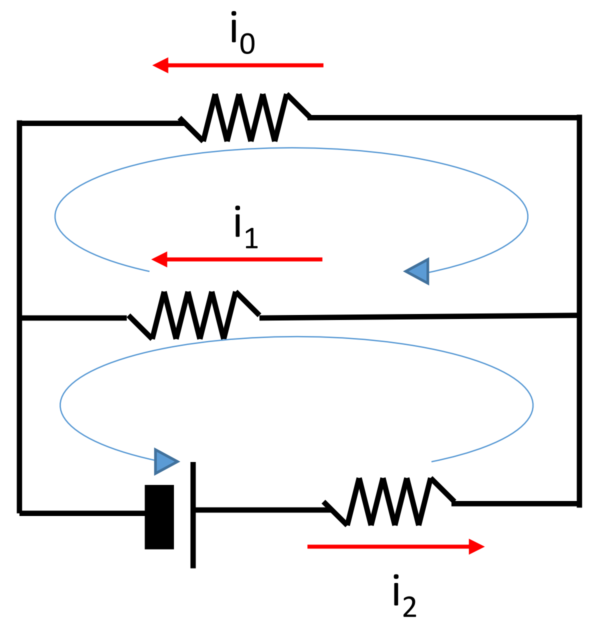
$R_{012} = R_2 + R_{01} = R_2 + \frac{R_0 R_1}{R_0+R_1}$

で求められる。以上をまとめると

$$I_0 = \frac{V_0}{R_0} = \frac{E - V_2}{R_0} = \frac{E - R_2 I_2}{R_0} = \frac{E - R_2 \frac{E}{R_{012}}}{R_0} = \frac{E - R_2 \frac{E}{R_2 + \frac{R_0 R_1}{R_0 + R_1}}}{R_0}$$

$$= \frac{20 - 2\frac{20}{2 + \frac{2 \times 4}{2 + 4}}}{2} = 4\ [A]$$

復習問題2　解答



キルヒホッフを使った方法
回路方程式

$$\begin{cases} i_2 = i_0 + i_1 \\ 0 = -i_0 R_0 + i_1 R_1 \\ E = i_2 R_2 + i_1 R_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_2 = i_0 + i_1 \\ 0 = -2i_0 + 4i_1 \\ 20 = 2i_2 + 4i_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_1 = i_2 - i_0 \\ i_0 = 2i_1 \\ i_2 = 10 - 2i_1 \end{cases}$$

$$i_1 = 10 - 2i_1 - 2i_1$$

$$5i_1 = 10$$

$$i_1 = 2$$

$$i_0 = 2i_1 = 2 \times 2 = 4\ [A]$$