

電気電子回路

Electric and Electronic Circuits

情報理工学部

佐竹 賢治

Satake, Kenji

何故、電気電子回路を学ぶか？

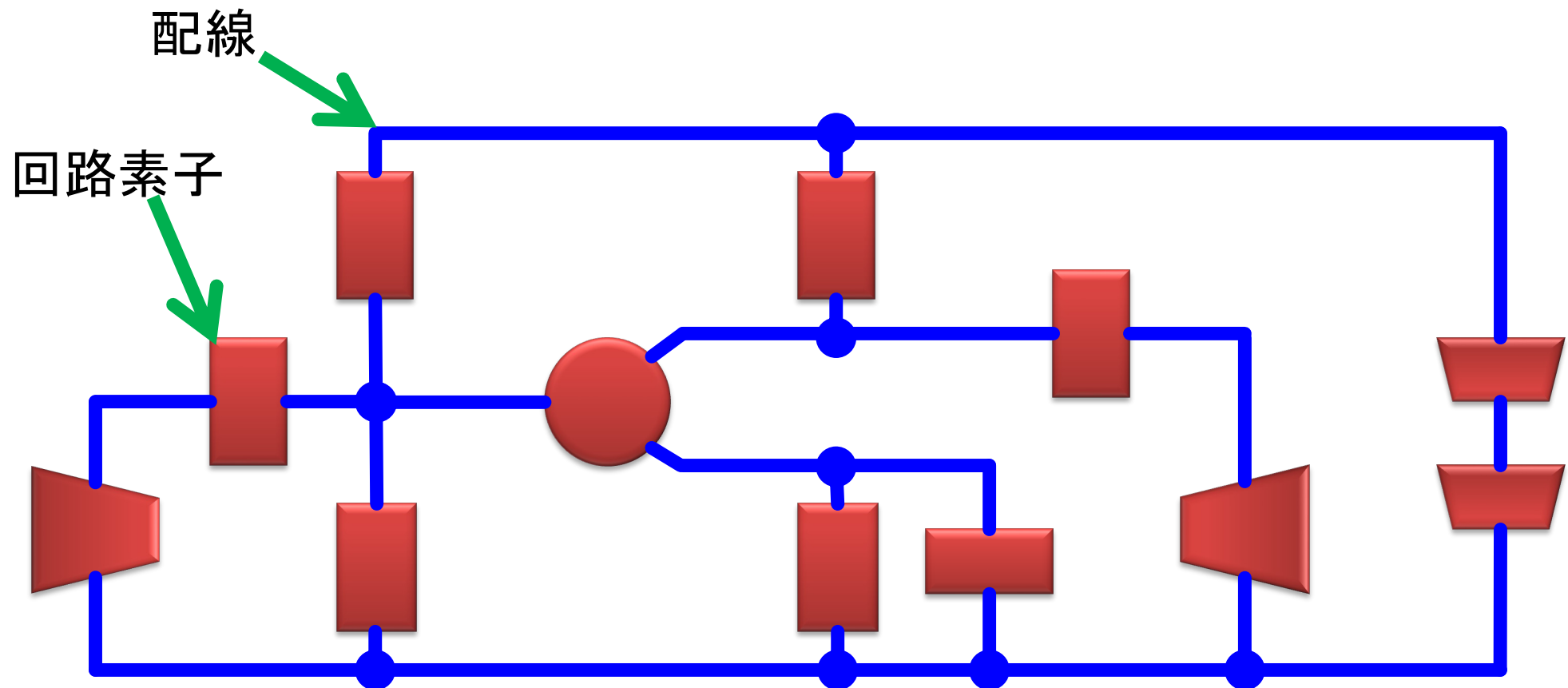
- 理工系の学生に必須の基礎知識
 - エレクトロニクスは我々の生活に不可欠の基盤技術
 - 情報、通信、家電、自動車、エネルギー
 - 世代を超えた共通の常識
 - 最新の IT 技術を知らない上司でも、電気電子は知っている
- 特に情理の学生には重要
 - 計算機ハードウェアの設計・開発に携わる場合：
 - 計算機も組み込みシステムも電気で動いているので、電気電子の基礎的な理解が不可欠
 - 計算機ソフトウェアの設計・開発に携わる場合：
 - 情報システムの処理対象は、センサー、通信、自動車、ロボット、電力などへと広がりがつつあり、これからのシステム設計者は電気電子の背景知識が不可欠

電気電子回路は面白い！

- 「電子」は目に見えないけど確かに存在する
 - 力学などと比べると、現象自体は目で見えにくい
 - しかし、理論も測定の手段も確立している
 - でも、なかなか期待通りの実験結果が得られない
 - 最後は動いてナンボ(理論に裏打ちされた洞察力)
- 人類を支える工学の一分野(実用に直結)
 - エネルギーを使う(電力、自動車、ロボット)
 - 情報を伝える(通信、放送)
 - 情報を処理する(プロセッサ、集積回路)

そもそも「回路」^{Circuit}とは何か？

- 回路素子（電気部品）を配線でつないだもの



- 使う回路素子の種類によって様々な回路になる

「電気回路」と「電子回路」

電気回路 (Electric Circuits)

- ^{resistor}抵抗と^{capacitor}コンデンサと^{inductor}コイルだけからなる回路
 - 電圧と電流の関係が線形
- 電気回路に関し、この授業では以下のようなことを学ぶ
 - 直流回路
 - 電圧、電流、抵抗、オームの法則、キルヒホッフの法則
 - 正弦波交流回路
 - コンデンサ、コイル、フェーザ、フィルタ回路、同調回路
 - 過渡現象の解析
 - 微分方程式、時定数

電子回路 (Electronic Circuits)

- ダイオードやトランジスタなどの素子を含む回路
 - 電圧と電流の関係が非線形
- 電子回路に関し、この授業では以下のようなことを学ぶ
 - ダイオード、バイポーラトランジスタ、電界効果トランジスタ
 - 各素子の原理、直流特性
 - 整流回路、増幅回路など
 - オペアンプ回路
 - オペアンプの特性、負帰還、増幅回路、フィルタ回路
 - 論理ゲートと論理回路
 - デバイスと論理ゲートの歴史、静特性、性能と消費電力

この授業の計画

- 2014年度は「**電気回路**」を扱ってから「**電子回路**」を扱った
 - 比較的学びやすい内容と、高度な数学知識が必要な内容が何度も交互に登場 ⇒ 最初の方で挫折しやすい
- 2015年度より電気・電子回路の「**直流**」での振る舞いを扱い、その後、「**交流**」および「**過渡現象**」を扱うよう改めた

– **直流回路**: 電圧や電流が変化しない回路

前半
8回

- 抵抗、ダイオード、トランジスタ、オペアンプ、論理ゲートについて、まず電圧と電流の定常状態での関係(静特性)をしっかり学ぶ
- 数学は連立一次方程式が解ければ大丈夫

– **交流回路**: 電圧や電流の向きが繰り返し変化する回路

– **過渡現象**: 電圧や電流が変化した時とその直後の現象

後半
6回

- 複素数や三角関数や微分方程式を使いながら、電圧や電流が時刻と共に変化する時の様子を学んで知見を広げる

教科書とのおおまかな対応

- 教科書:

教科書に書かれていない重要事項(過渡現象、電界効果トランジスタ等)はレジュメで補足します

亀井且有「学生のための基礎電子回路」(共立出版)

講義の内容と順序

教科書の内容

- 電気回路: 直流編
- ダイオード等: 直流編
- オペアンプ: 直流編
- 論理ゲート: 直流編
- 電気回路: 交流編
- オペアンプ: 交流編
- 電気回路: 過渡現象編

- 1章: 電子回路の基礎
- 2章: 交流回路の基礎
- 3章: 回路網の基礎
- 4章: 半導体
- 5章: ダイオード
- 6章: トランジスタ
- 7章: 論理回路
- 8章: 増幅回路
- 9章: オペアンプ

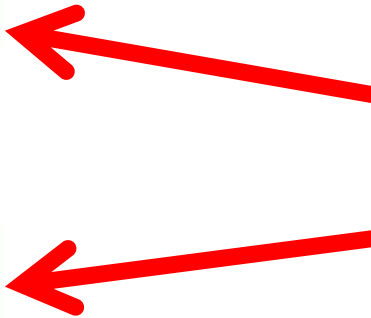
成績評価方法

- 試験(50%)

- 以下の6分野の問題を出題する

- 直流電気回路
 - 正弦波交流回路
 - 過渡現象の解析
 - ダイオード等
 - オペアンプ回路
 - 論理ゲートと論理回路

まずはこれらを
しっかりおさえよう

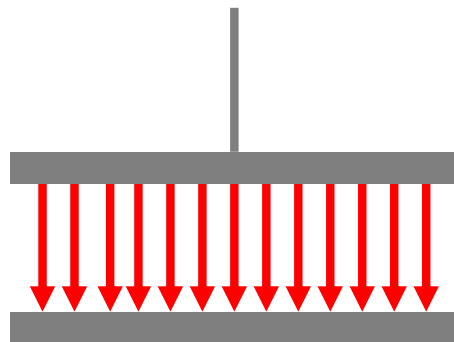


- レポート(50%)

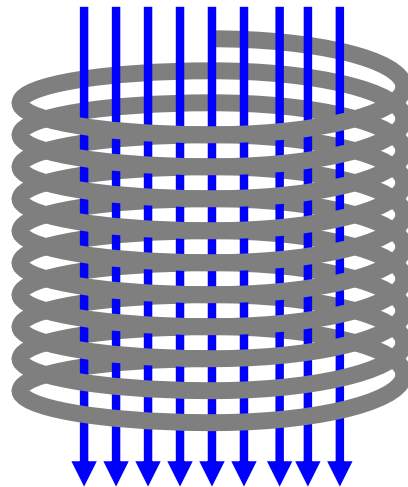
- 到達度を確認するため、演習問題のレポートを4回課す

- 2014年度までとは進め方を大幅に変えたので、きちんと勉強する 人には学びやすくなっている筈です
 - 用語を回答させる穴埋め問題や選択問題は一切出題しません
 - 試験直前の「一夜漬け」で単位を取るのは無理です

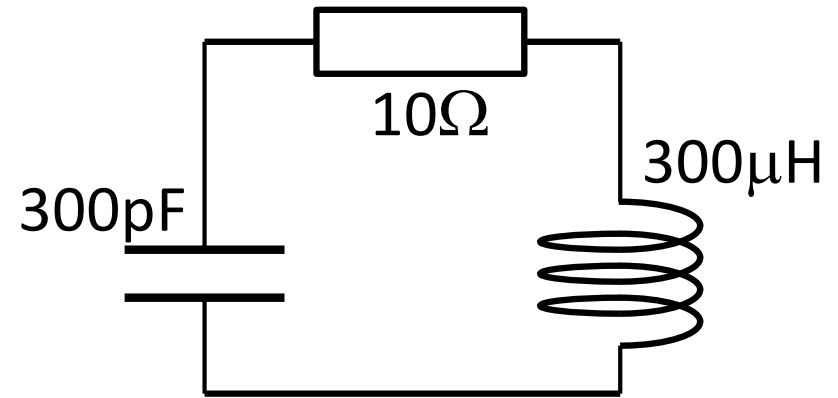
物理2(電磁気学)との関係



平行平板
コンデンサ



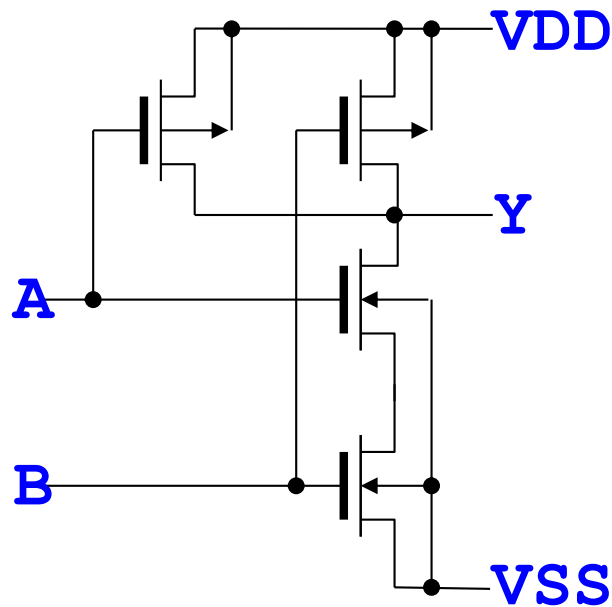
ソレノイド
コイル



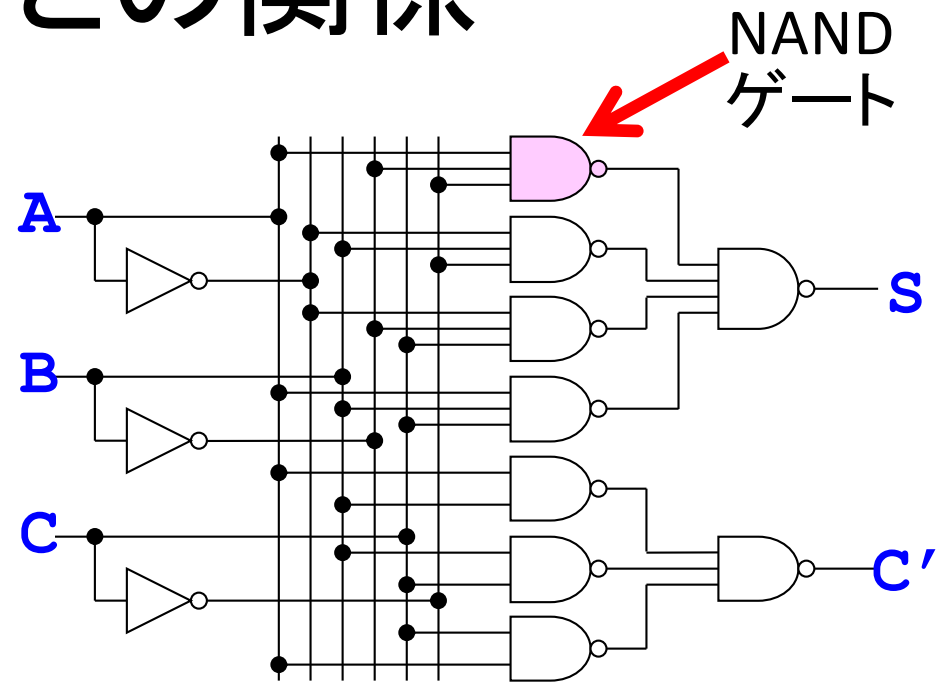
共振回路

- 電磁気学では、Maxwellの方程式などを用いて電気と磁気によって**3次元空間において引き起こされる物理現象**を解析する
- 電気電子回路では、**性質のわかっている素子**をつなぎ合わせて得られる**回路の振る舞い**を解析し、目的に合った回路を設計する

論理回路との関係



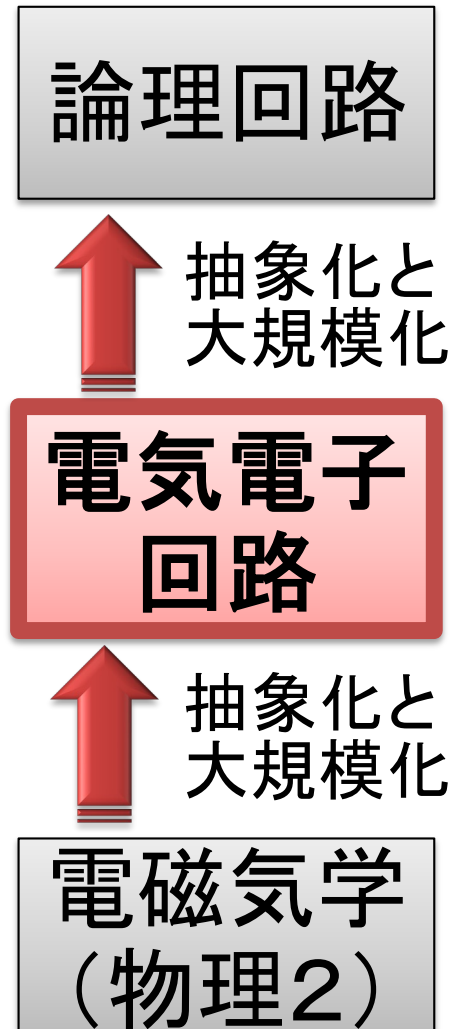
MOSTランジスタを用いた
NANDゲート



NANDゲートを用いた
全加算器

- 電気電子回路では、抵抗、コンデンサ、コイル、ダイオード、トランジスタなどからなる基本的な回路について学ぶ
- 論理回路では、多数の論理ゲートや記憶素子を使用して、演算や制御を行うデジタル回路を構築する方法を学ぶ

この授業で扱う範囲と前提知識



- 論理回路や電磁気学(物理2)の内容は、この授業の到達目標(試験範囲)ではない
 - 但し、この授業を理解するのに必要な内容については、随時説明を行う
 - 場合によってはかなり深入りする
- 行列は使わないが、中学レベルの連立方程式は使用する
 - 難しくはないが、面倒かも知れない
- 高校3年レベルの微積分は使う
 - 授業でも適宜基礎は確認するが、各自の努力も必要
- 情報基礎数学との同時履修を勧める
 - 過渡現象解析で微分方程式が役立つ

開講にあたってのアドバイスとお願い

- 重要な概念や用語は明確に理解すること
 - 例えば「電圧」と「電流」の区別を曖昧にしてはいけない
 - 公式を暗記しただけでは「わかった」ことにならない
- 左脳(公式・計算)と右脳(イメージ)の両方が必要
 - 見えない電気を「心の眼」で捉え、数値は正確に求める
- 例題を解いて理解を深めること
 - 計算問題は自分で手を動かして解くことが肝要
 - **符号**(プラス・マイナス)や**単位**(A, mA, μ A)にも注意を払う
- 講義に出席したら集中すること
 - **授業に出ないで自習で理解するのは、かなり厳しい**
 - **高校時代に物理(電気)が得意だった人も油断は禁物**
 - 出席して授業妨害(私語)をするのは厳禁
 - 授業中に出席をとったり抜き打ちテストを実施したりすることはありませんので、授業に集中できない人は来ないで下さい

電氣電子回路

第1回：直流電氣回路(1)

今週の内容

- 抵抗と直流電圧源だけからなる直流回路を扱うための準備として、関連する基礎事項を確認します
 - 電気
 - 電荷、電流
 - 電場、電圧
 - 電力、抵抗
- これらを踏まえ、直流回路に関する以下の事項を学びます
 - オームの法則
 - 抵抗の直列回路および並列回路の合成抵抗

中学の復習:「電流」と「電圧」

- 家庭教師のつもりで中学生にわかる説明を試みよう

- 中学の教科書での説明

- 電流

- 電気の流れ
 - 電流の大きさの単位はA(アンペア)

流れている「電気」とは何だろう？

流そうとする「働き」とは何だろう？

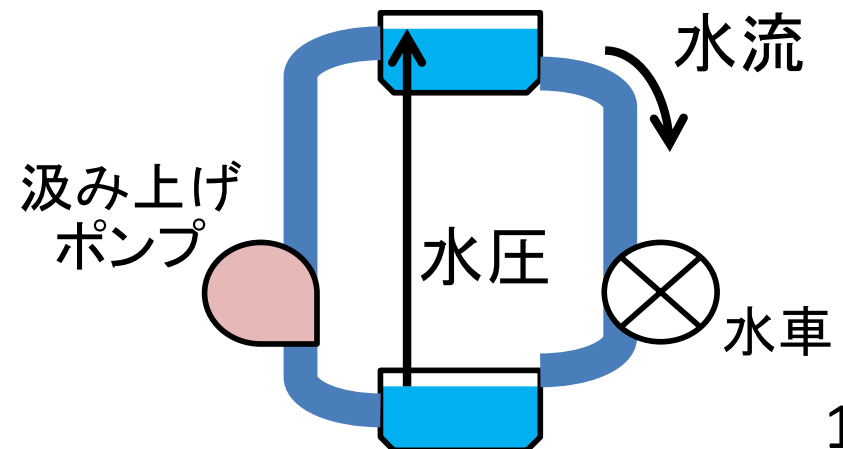
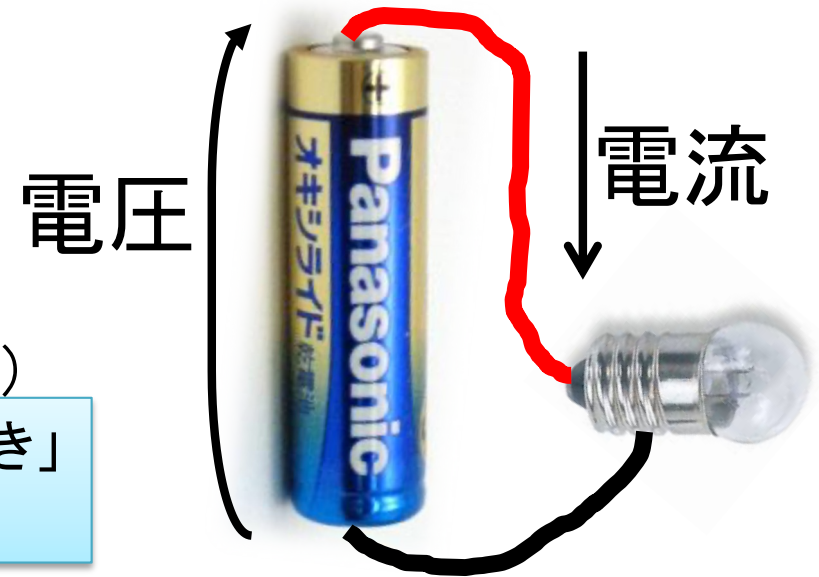
- 電圧

- 電流を流そうとする働き大きさ
 - 電圧の単位はV(ボルト)

- 水流を用いた説明

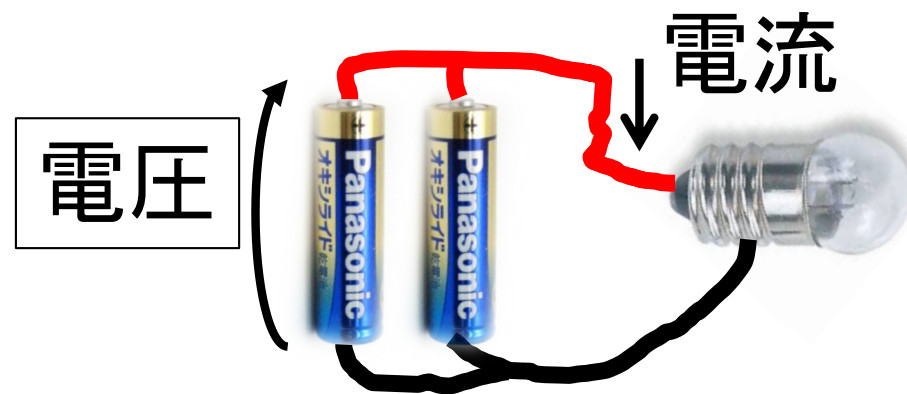
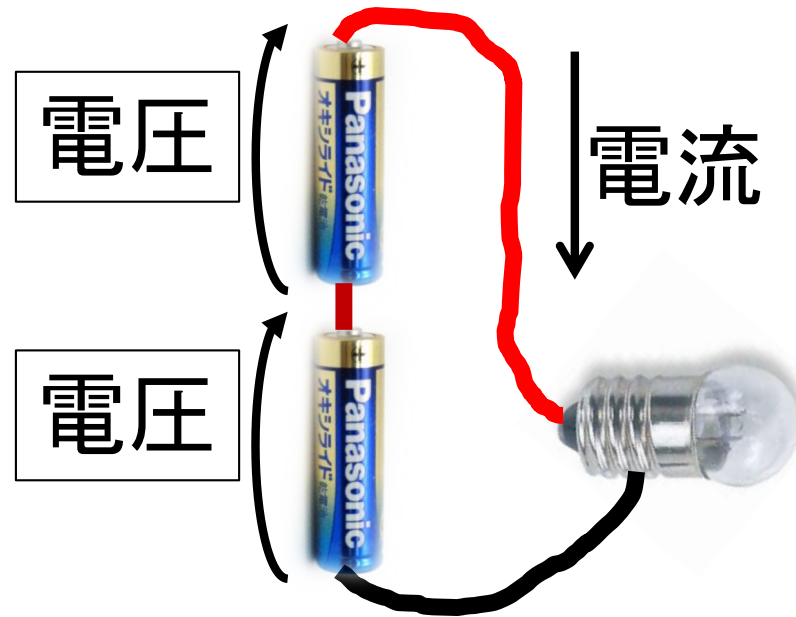
わかったつもり？

- 水に例えれば、
電流は水流、電圧は水圧



中学の復習：電池の「直列」と「並列」

- 電池を直列にすると
電圧は倍になる
 - 電圧が倍になるから
電流も増える
 - 水に例えれば、ポン
プを直列にすると水
圧が倍になる
- 電池を並列にしても
電圧は変わらない
 - 水に例えれば、ポン
プを並列にしても水
圧は変わらない



こんな説明で「電圧」と「電流」が理解できるか？

電気とは何か？



- 我々は、以下のような現象を起こす働きをまとめて「電気」と呼んでいる
 - プラスの電荷とマイナスの電荷の間には引力が働き、同符号の電荷の間には反発力が働く(クーロンの法則)
 - 電流から磁場が生じ、変動磁場は起電力をもたらす
- 「金属は電気をよく通す」→回路
 - 金属の中は電子が移動しやすい
 - 電線(細長い金属)を使うことで、我々は電子の移動する経路を自由に決めてやることができる

火気＝ひのけ
水気＝しめりけ
電気＝？？？

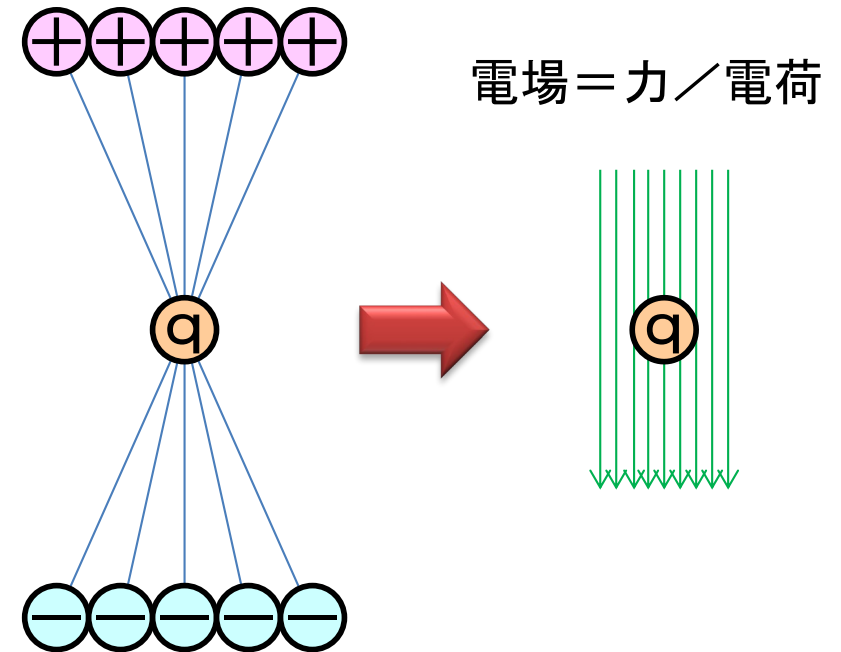
「電流」(electric current)

electric charge

- 電子のような電荷の担い手が同じ方向へたくさん移動することを「電流」と呼ぶ
 - 電流は、単位時間あたりに移動する電荷の量で表す
- 電流の単位は A(アンペア)
 - Aという電流の単位は、電流が流れる電線同士の磁気的な反発力の強さによって国際的に定義されている
- 直感的な例
 - 1Aの電流が1秒間流れたときに移動する電荷の量が 1 C(クーロン) で、これは電子 6.24×10^{18} 個分
 - 100V40W の電球を流れる電流は0.4A
 - 電源電圧が1V、消費電力が10Wのプロセッサの消費電流は10A

「電場」(electric field)

- 空間上にたくさんの電荷が存在しているとき、これらがある場所の電荷に及ぼす力を考えるのは面倒
- そこで、その場所で電荷に力を及ぼす強さを考え、「電場」と呼ぶことにする



	重力場	静電場
力を受ける量	質量	電荷
場の強さ	重力加速度	電場
受ける力	質量 × 重力加速度	電荷 × 電場
移動して増減するエネルギー	力 × 距離	力 × 距離

「電圧」(electric voltage)

- 電荷の移動に必要な 仕事 = 電荷 × 電場 × 距離
- 電気回路では、回路素子の中の電場や回路素子の長さ(電荷の移動距離)には興味が無い
 - 回路素子の入口と出口のエネルギー差が分かればよい
- そこで「電場 × 距離」を電位差(電圧)と呼ぶことにし、仕事 = 電荷 × 電圧と表すことにした
- 電圧の単位は V(ボルト)
 - 1Vの電位差に逆らって1Cの電荷を移動させるのに必要な仕事は 1J(ジュール)
- 直観的な例
 - 乾電池の電圧は 1.5V
 - 日本のコンセントの電源は 100V
 - 一般的な電柱の高圧線は 6600V

電力 (electric power) の単位

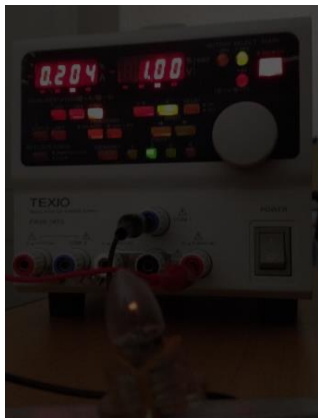
- 電力の単位は **W (ワット)**
 - 1Vの電圧を加えて1Aの電流が流れた時に失われる電力は1W
 - 力学の仕事率と同じであり、1Wの仕事率は、毎秒1J (ジュール) の仕事である
- 直観的な例
 - 電熱線に100Vの電圧をかけて6Aの電流が流れた時、600Wの電力が消費される
 - $1\text{W} = 1\text{J}/\text{秒}$ であり、 $\text{約} 4.2\text{J} = 1\text{cal}$ (熱の仕事当量) なので、600Wを消費する電熱線は100gの水の温度を毎秒約 1.4°C ずつ上昇させることができる

電圧と電流の関係

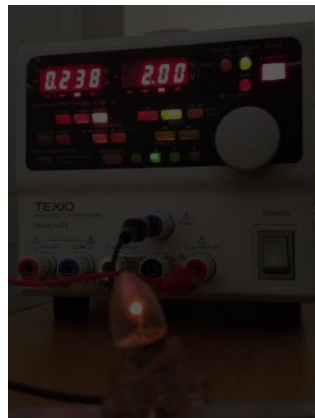
- 電圧に比例して電子に力がかかるから、同じ物に電圧をかけた時、流れる電流は電圧に比例する？
 - 電圧(電位差): V (ボルト)
 - 電場の強さ: V/m (1mあたりの電位差)
 $= N/C$ (1Cの電荷にかかる力)
- 本当に電流が電圧に比例するかどうか、測定してみよう！

実験：豆電球の電圧と電流の関係

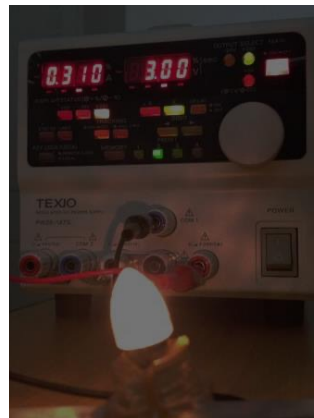
- 自転車のライト用の電球を使用
(6V 2.4W)
- 電源装置で電圧をかけ、電流をテスターで測定
- 実験日：2014年9月8日、室温26.3℃



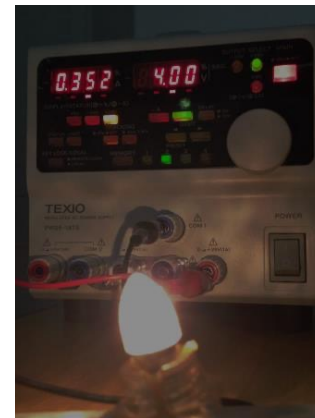
1Vの時



2Vの時



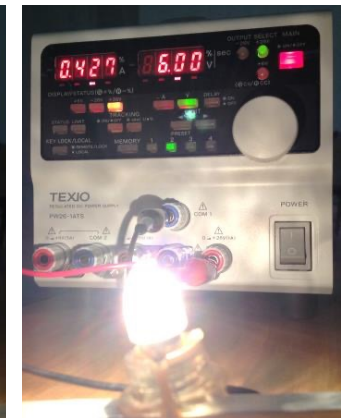
3Vの時



4Vの時



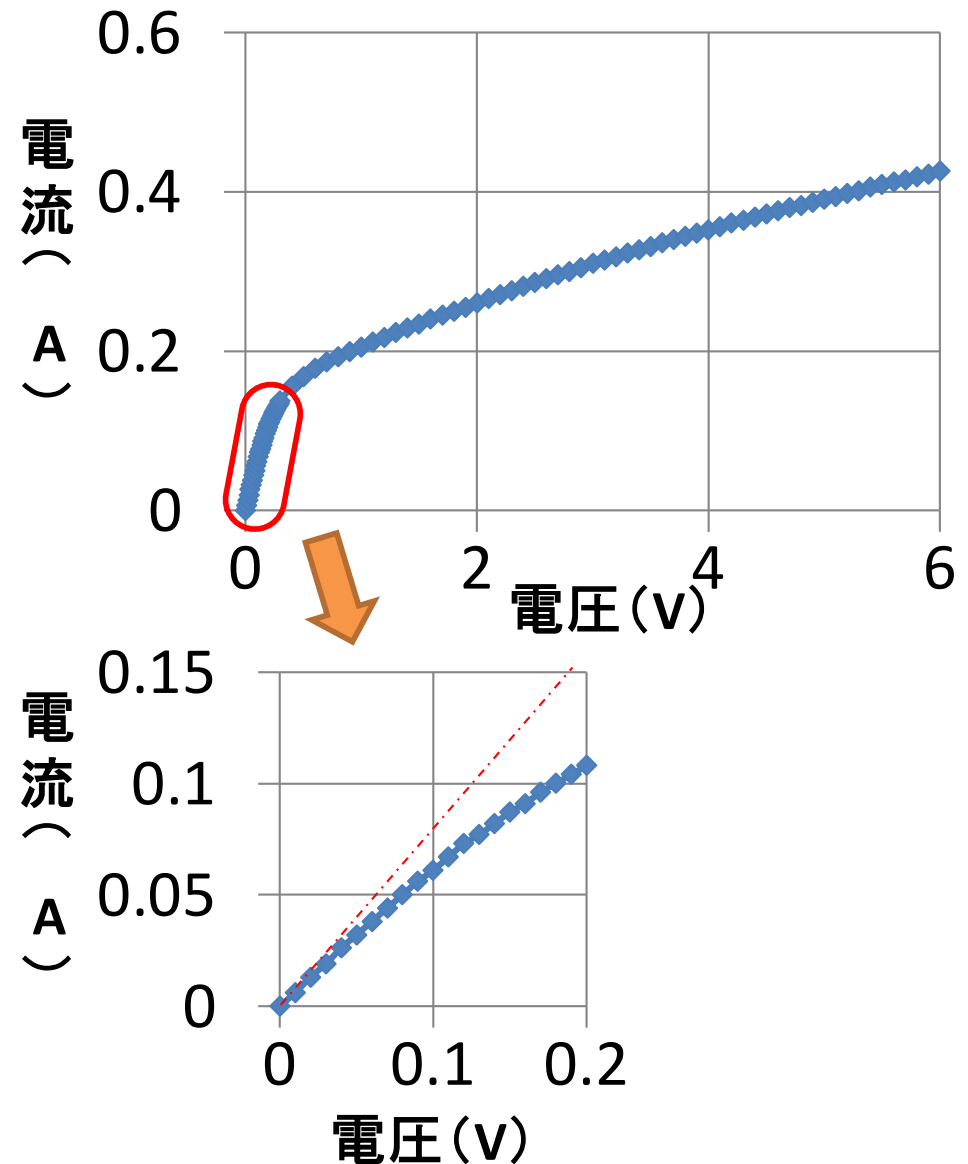
5Vの時



6Vの時

豆電球の実験結果

- かけた電圧と、流れた電流の関係は、比例関係ではなかった！
- しかし、電圧が0.1V以下の時は、比例関係が認められる
- 何故だろう？ 考えよう！
 1. この結果は何かの間違いで、有り得ない
 2. 実験中に電球が壊れた
 3. 測定誤差と考えられる
 4. 豆電球に固有の性質によるものだろう



電流が電圧に比例するとは限らない

- 豆電球の場合

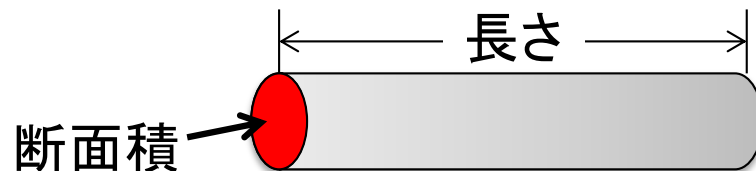
- 一般に金属の電気抵抗は **絶対温度に比例** する
- 豆電球に電流を流すとフィラメントが高温になって光る
- だから、フィラメントが光るぐらいの電圧をかけた時は、電流の増加が抑制される

- 他の例

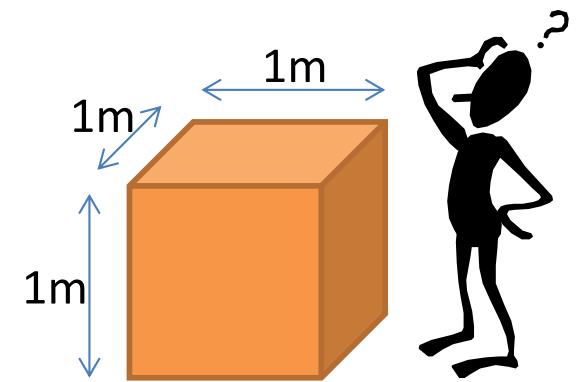
- 半導体は電圧と電流が比例しない(**非線形**)
 - 例えばシリコンダイオードは 0.6~0.7V 以上かけないと、ほとんど電流は流れない
 - 例えば赤色LEDは約2V以上かけないと、ほとんど電流は流れない
- 物質によっては、極めて低い温度にした時に抵抗値が0になるものもある(**超伝導**)

抵抗値 (resistance)

- 金属など、電流を流しやすい物質 (**導体**) は、常温では一般に電圧に比例した電流が流れる
 - 電圧が高いほど、電界が強くなり、電子にかかる力が大きくなるから電流は増加する
 - 温度が高くなると、原子核の振動が大きくなり、電子の移動が妨害されやすくなるから電流は減少する
- 電流の流れにくさ (抵抗値) は、物質の種類と形状によって異なる
 - 主な金属を流れやすい順に並べると、銀、銅、金、アルミニウム、タングステン、鉄、ニクロム合金
 - 抵抗値は **長さ** に比例し、 **断面積** に反比例する



抵抗値の例



- 銅の場合

- 断面積が 1m^2 、長さが 1m の銅の塊の抵抗値は、 $1.7 \times 10^{-8}\Omega$
- 抵抗値は断面積に反比例するから、断面積が 1mm^2 、長さが 1m の銅の針金の抵抗値は 0.017Ω

nichrome

- ニクロム線の場合

- 断面積が 1m^2 、長さが 1m のニクロムの塊の抵抗値は、 $1.1 \times 10^{-6}\Omega$
- 抵抗値は断面積に反比例するから、断面積が 1mm^2 、長さが 1m のニクロム線の抵抗値は 1.1Ω
- 太さ 0.2mm の針金(断面積 0.0314mm^2)なら、長さ 1m で 35Ω になる

ここまでのまとめ

- 今週の授業内容を理解するのに必要な電磁気学の関連事項を概観した
 - 電気 electricity
 - 電荷(単位は C 「クーロン」) charge (coulomb)
 - 電流(単位は A 「アンペア」) current (ampere)
 - 電場 electric field
 - 電圧(単位は V 「ボルト」) voltage (volt)
 - 電力(単位は W 「ワット」) power (watt)
 - 抵抗(単位は Ω 「オーム」) resistance (ohm)
- ここからが、「直流電気回路」です

オームの法則と「抵抗」

- **オームの法則** (Ohm's law)
 - 金属など、電流を流しやすい物質(導体)は、常温では一般に **電圧に比例した電流が流れる**
- つまり、電圧 V と電流 I の間には **$V = IR$** という関係が成立し、この比例係数 R を「**抵抗値**」(resistance)と呼ぶ
- 抵抗値の単位は **Ω (オーム)**
- また、オームの法則が成立する物質でできた回路素子のことを「**抵抗器**」(resistor)と呼ぶ
- 日本語では抵抗値も抵抗器も「**抵抗**」と呼ぶ

オームの法則の例

- 35[Ω]のニクロム線に100[V]の電圧をかけた時の電流および消費電力を求めよ(但し温度の影響は考えないことにする)

$$100[\text{V}] \div 35[\Omega] = 2.9[\text{A}]$$

$$100[\text{V}] \times 2.9[\text{A}] = 290[\text{W}]$$

- 150[Ω]の抵抗器に1.5[V]の乾電池を接続した時に流れる電流を求めよ

$$1.5[\text{V}] \div 150[\Omega] = 0.01[\text{A}] = 10[\text{mA}]$$

- 5[V]の電圧をかけたら 2[mA]の電流が流れる抵抗値を求めよ

$$5[\text{V}] \div 2 \times 10^{-3}[\text{A}] = 2.5 \times 10^3[\Omega] = 2.5[\text{k}\Omega]$$

1.5[V]の
単3乾電池 150[Ω]の
抵抗器



回路図記号

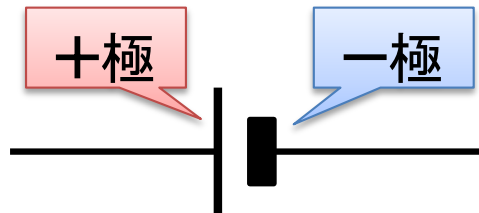
- 電気電子回路では、回路素子を配線で接続した様子を「回路図」(schematic diagram)で表す
- 回路素子は所定の記号を使って表す

以前はこのような記号が使われていた

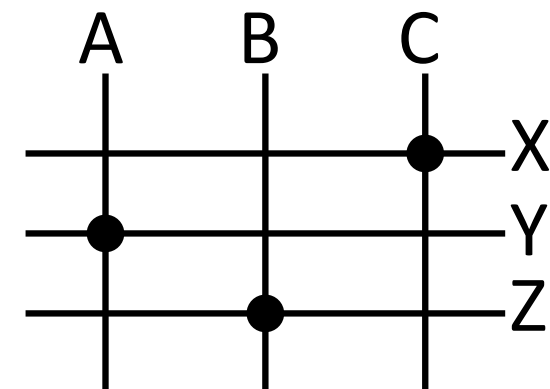
－ 抵抗



－ 直流電圧源

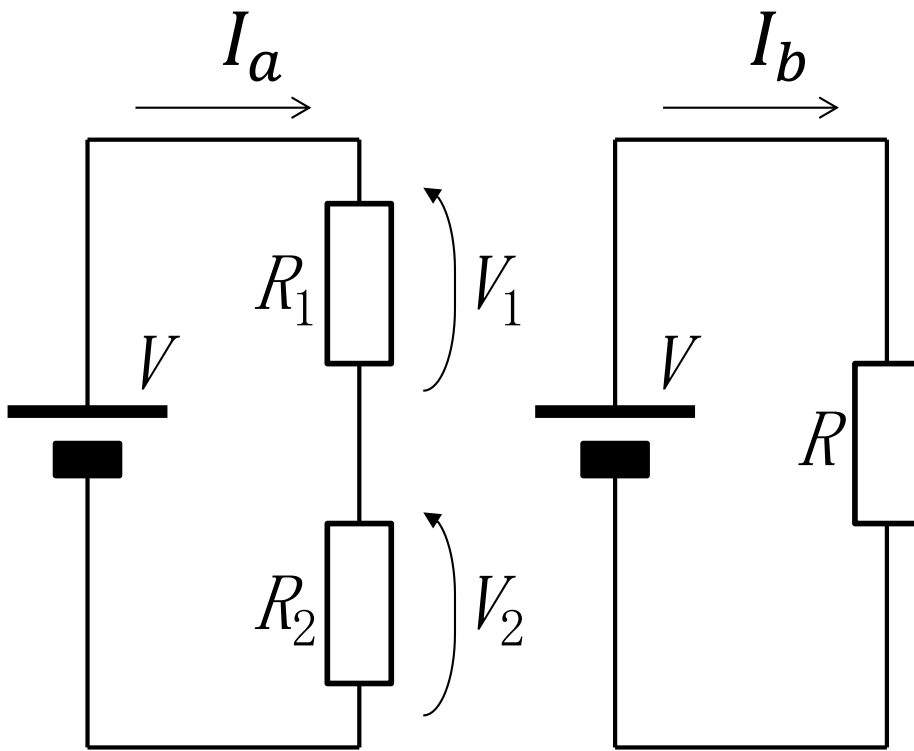


- 配線は、実線で表す
 - 配線同士の接続は、交差箇所に黒丸を付けて表す
 - 黒丸無しで交差している配線は、絶縁されている



直列回路 (series circuit) と合成抵抗

- $I_a = I_b$ となるような、右の回路の抵抗 R の値を求めなさい



左の回路より:

$$V_1 = I_a R_1$$

$$V_2 = I_a R_2$$

$$V = V_1 + V_2$$

よって

$$V = I_a (R_1 + R_2)$$

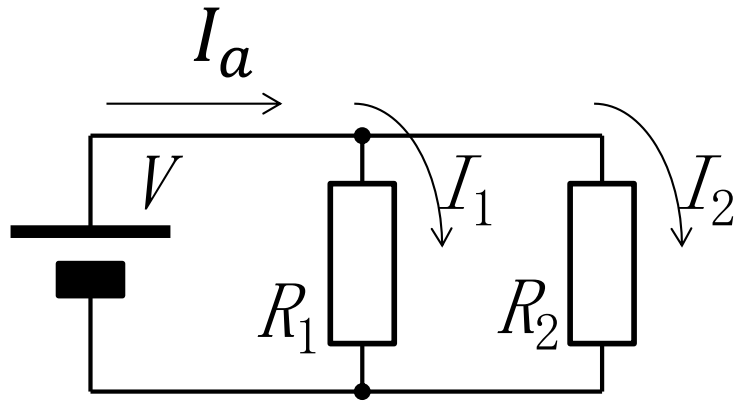
右の回路より

$$V = I_b R$$

よって、 $I_a = I_b$ となるためには
 $R = \boxed{R_1 + R_2}$ にすればよい

並列回路 (parallel circuit) と合成抵抗

- $I_a = I_b$ となるような、下の回路の抵抗 R の値を求めなさい



上の回路より:

$$I_1 = \frac{V}{R_1}, \quad I_2 = \frac{V}{R_2}, \quad I_a = I_1 + I_2$$

よって

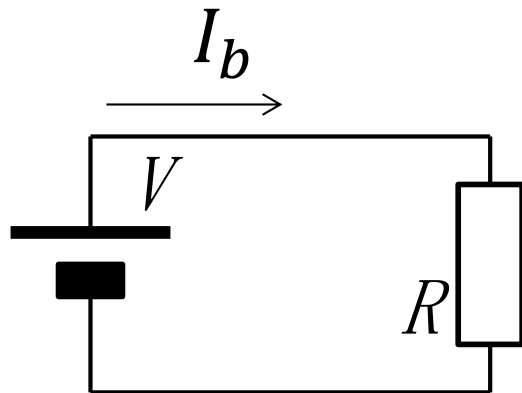
$$I_a = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

下の回路より

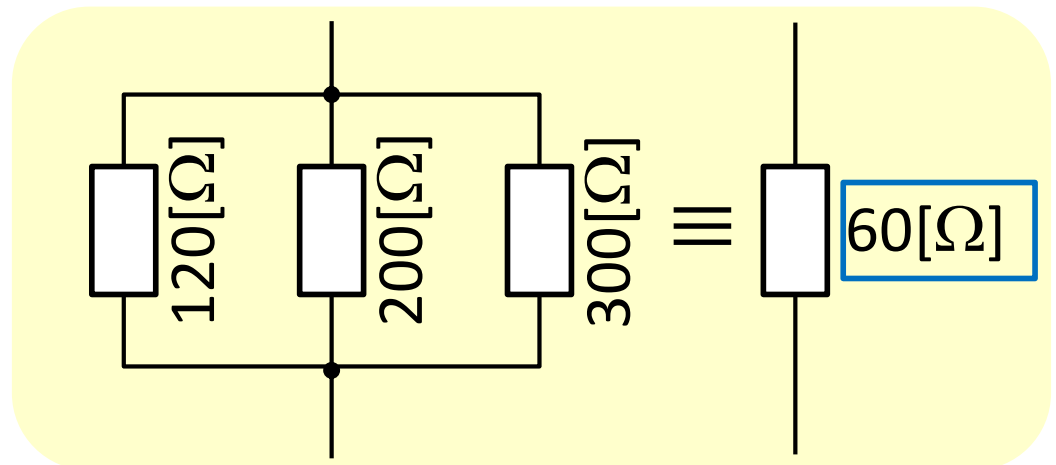
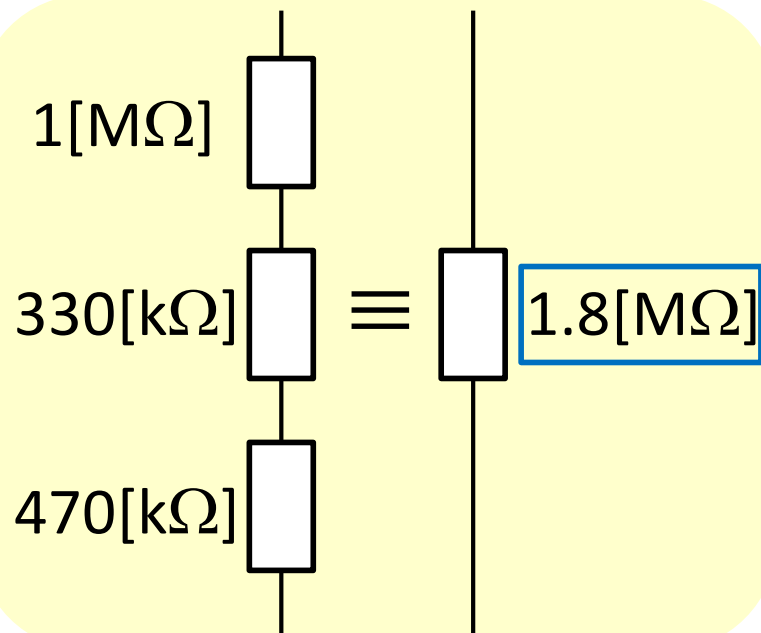
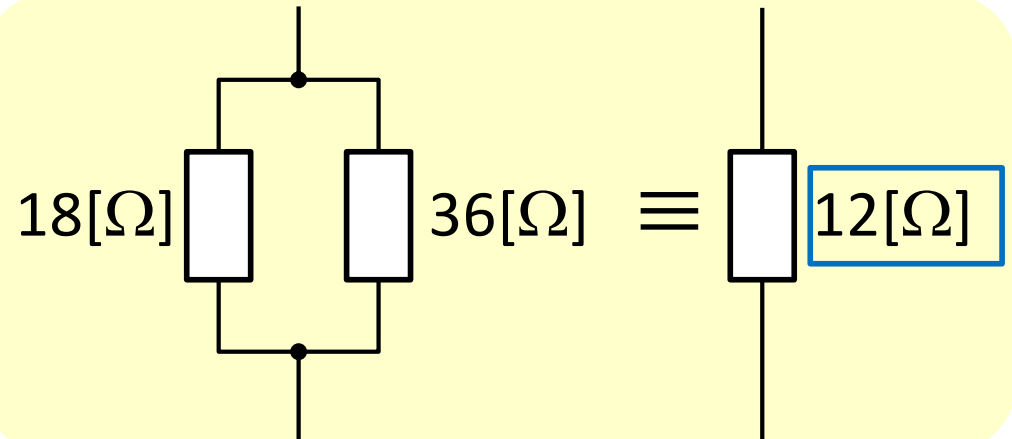
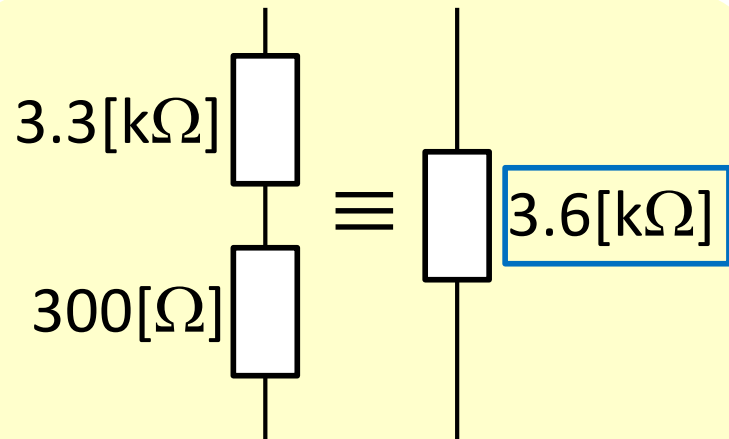
$$I_b = \frac{V}{R}$$

よって、 $I_a = I_b$ となるためには

$$R = \boxed{\frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}} = \boxed{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \text{ にすればよい}$$



合成抵抗の例

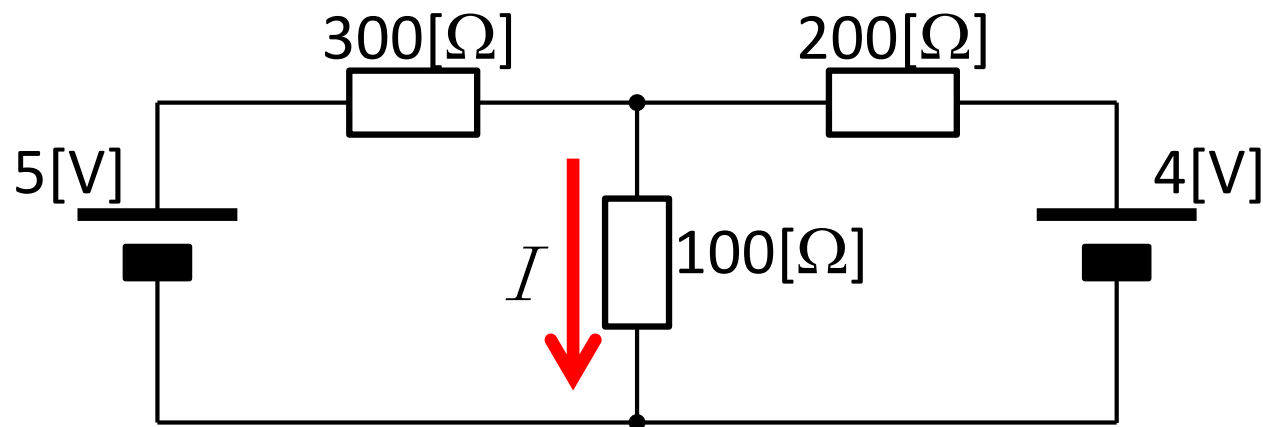


演習問題(教科書P.11)

- 以下の問題を解いてみよう
 - 問題 1-1 の (a)
 - 問題 1-1 の (b)

来週の内容

- 今週学んだ方法では、例えば下の回路の電流 I を求めることはできない



- 来週は、「キルヒホッフの法則」を学び、例えば上のような問題を解きます

電気電子回路(第1回)講義は これで終わりです

質問: support_eccra@sl.is.ritsumei.ac.jp

直接返信する場合と、まとめてmanaba+に掲示する場合があります。ご了承ください。