

回路を考える

第2回 回路網の話(オフセット付き抵抗編)

ザインエレクトロニクス株式会社

源代 裕治

gendai-yuji@thine.co.jp

第1回 2018年10月23日(火) 歴史と今 --- 先人たちの苦闘、今に残る混乱

 第2回 2018年11月 6日(火) 回路網の話(オフセット付き抵抗編)

第3回 2018年11月13日(火) 回路網の話(変化に応答する回路編)

第4回 2018年11月27日(火) 素材(素子)に親しもう

第5回 2018年12月 4日(火) もっと回路と話そう。話せば分かる。

各回の内容は進捗に応じて見直します。

毎回レポート課題を出します。解けるものを提出ください。

『電圧』って何？

『電流』って何？

『電流』とは保存量である

KCL: Kirchhoff's Current Law or

KFL: Kirchhoff's Flow Law

『電圧』とはポテンシャルである

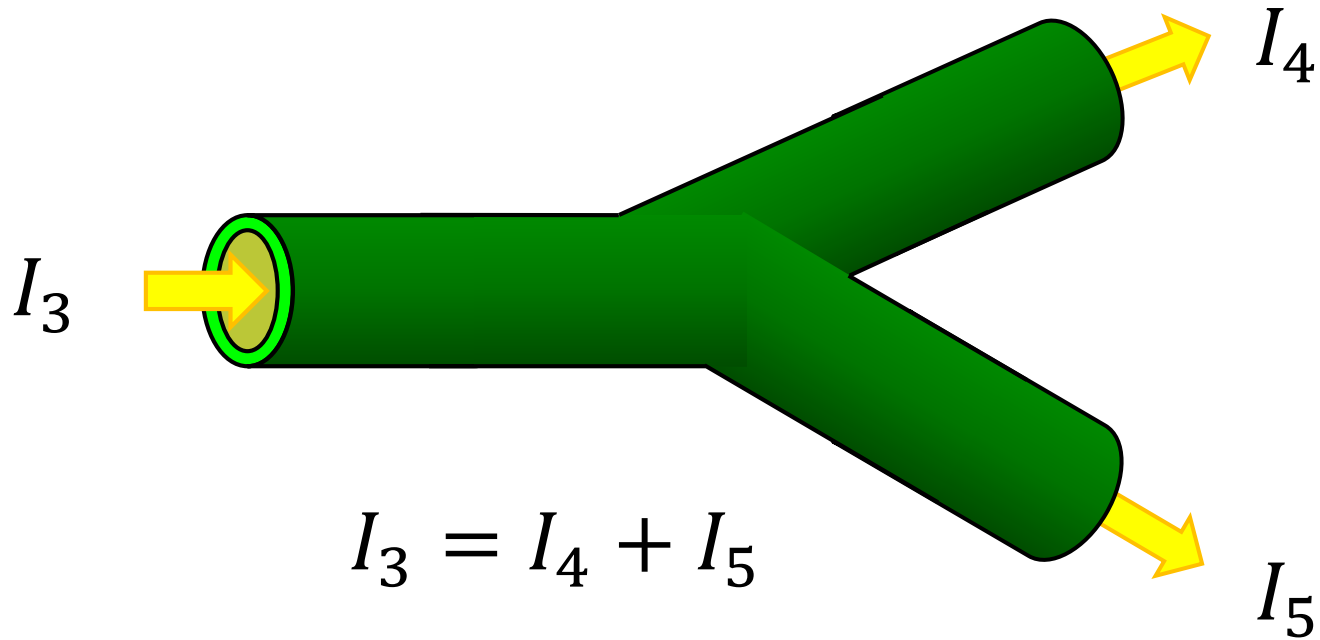
KVL: Kirchhoff's Voltage Law or

KPL: Kirchhoff's Potential Law

電流は保存量

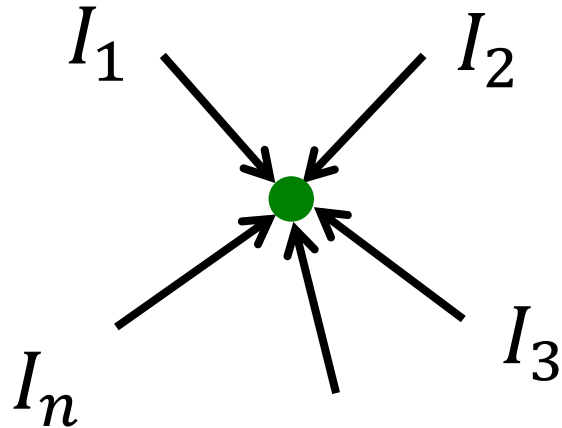


$$I_1 = I_2$$



$$I_3 = I_4 + I_5$$

Kirchhoff's Current Law



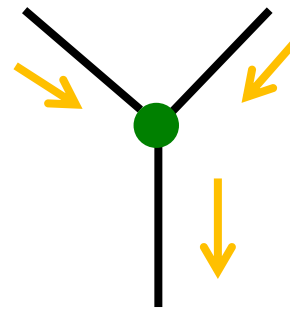
回路配線のどの点においても、その点が配線を n 本の枝に分割する($n \geq 2$)とき、各枝に流れる電流の総和は0となる。

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

ただし、電流の向きはその点に流れ込む方向を正とし、逆向きの電流は負で表す。



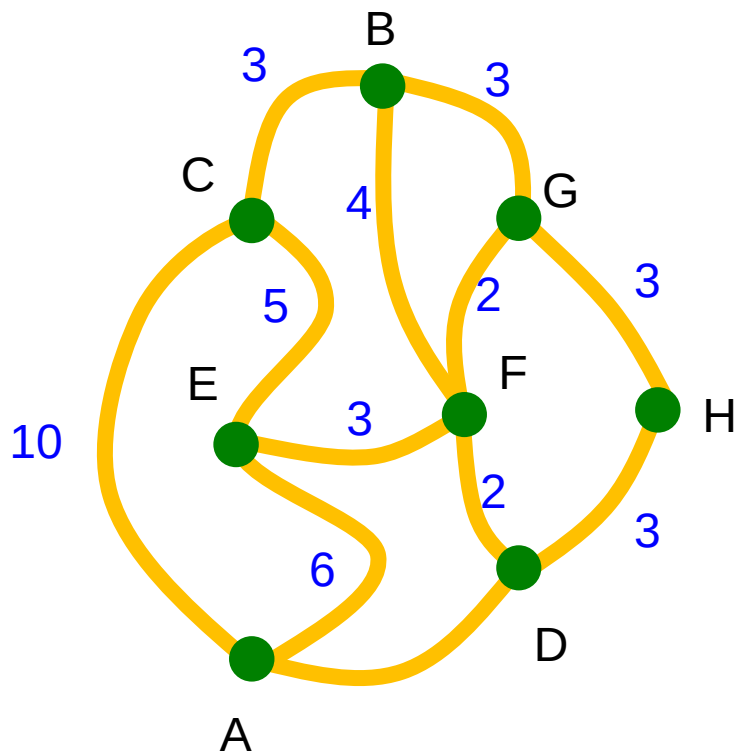
分岐していない配線なら、電流値は変わらない。



電流が合流する所では、電流値が加算されて出てゆく。

ポテンシャルとは何か

定義を見る前に、場所に依存する大抵の量は、ポテンシャルではないことを見よう。



左図で、各拠点(●)と、それを結ぶ道路を表しているでしょう。道路の長さを青じで示した。(距離の単位は任意)

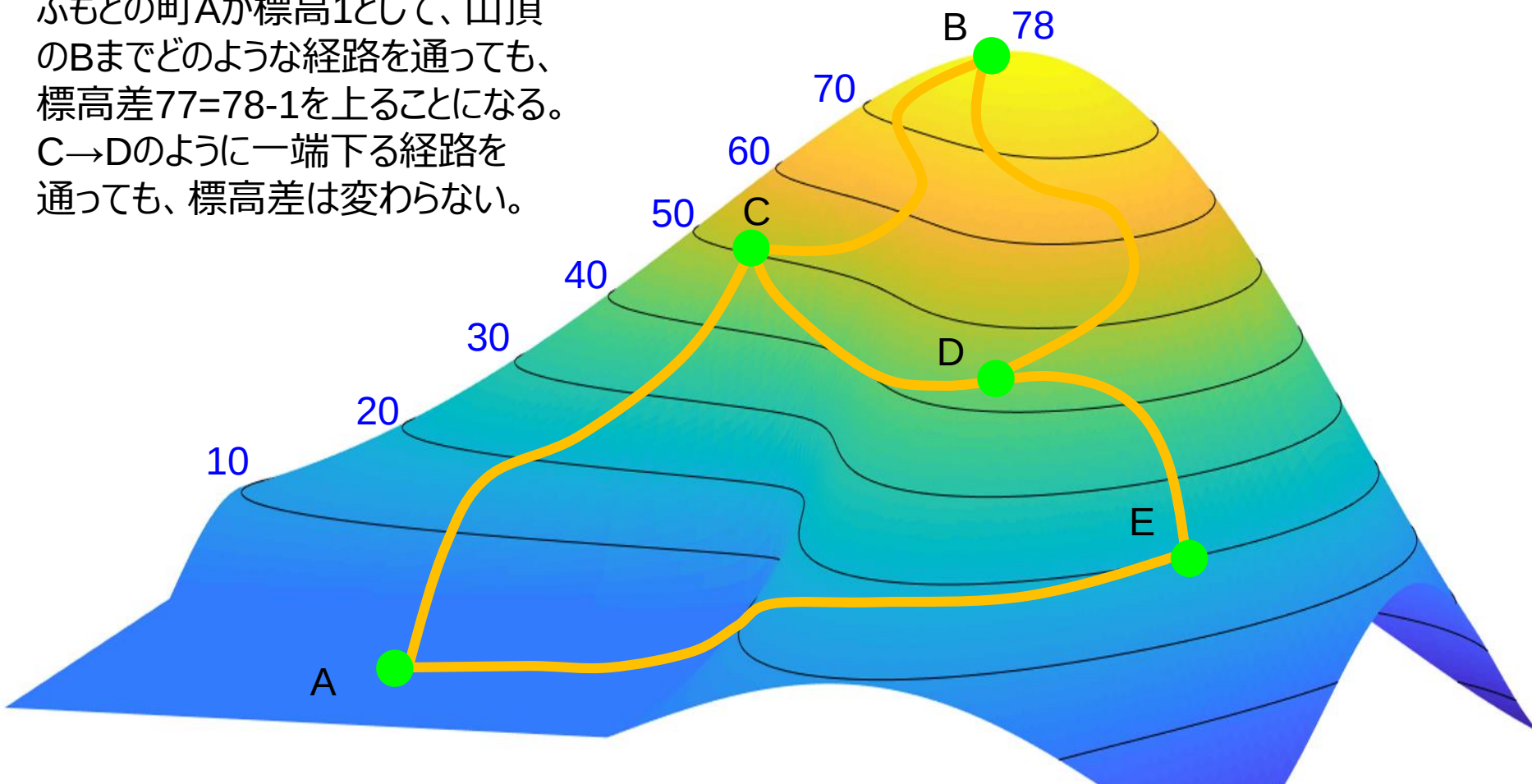
AからCに行くとき、直通経路では10の距離だが、Eを経由すると $6+5=11$ の道のりとなる。両行程が同じ距離になる方が稀であろう。

あるいは、回り道をしてBを経由したり、迷子になって行ったり来たりしたら、道程(移動距離)はひたすら増えてゆく。

道程は移動に伴い変化する量であり、2点を指定するだけでは決まらないのである。

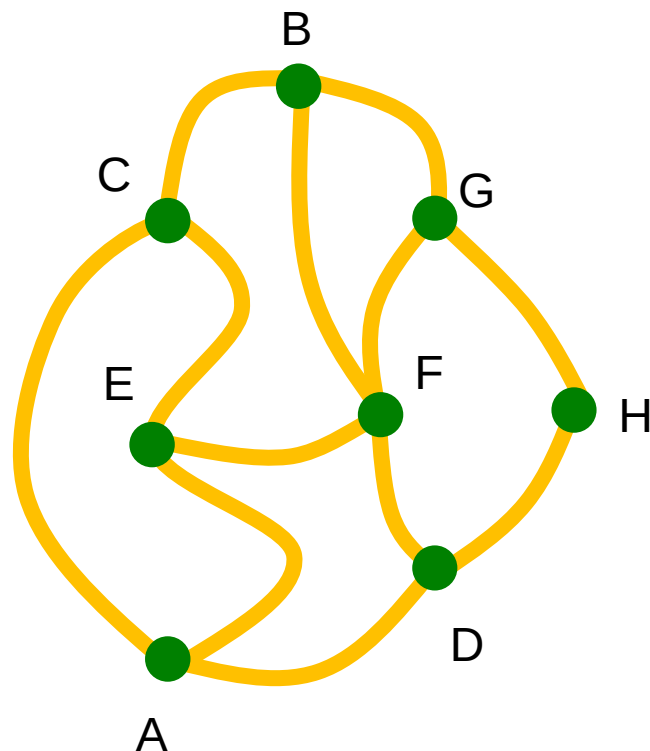
高さはポテンシャル

ふもとの町Aが標高1として、山頂のBまでどのような経路を通っても、標高差 $77=78-1$ を上ることになる。C→Dのように一端下る経路を通っても、標高差は変わらない。



標高のように、場所に依存して変わる量でありながら、変化量が経路に依らず、始点と終点の位置だけで決まる量を**ポテンシャル**という。

電圧もポテンシャル



回路の配線上の任意の2点で電位差(電圧)が決まっているとする。(直接配線されていなくても良い。)

AからBへの電位差を $V(A, B)$ と表記しよう。向きを考慮するので、逆向きでは符号が変わる。

$$V(A, B) = -V(B, A)$$

電位差が満たす法則は、AからBへ至るパスが複数あるとき、どの経路を通っても電位差の総和は $V(B, A)$ と同じになる、と表現できる。

$$\begin{aligned} V(A, B) &= V(A, C) + V(C, B) \\ &= V(A, E) + V(E, F) + V(F, B) \end{aligned}$$

このように、回路上の電圧差は2点を指定するだけで決まり、経路を指定する必要がないと言える。このような量を一般に**ポテンシャル**という。

ポテンシャル量は、任意の閉経路(行って戻って来る経路)において電位差の総和は0になる、と言い換えることができる。

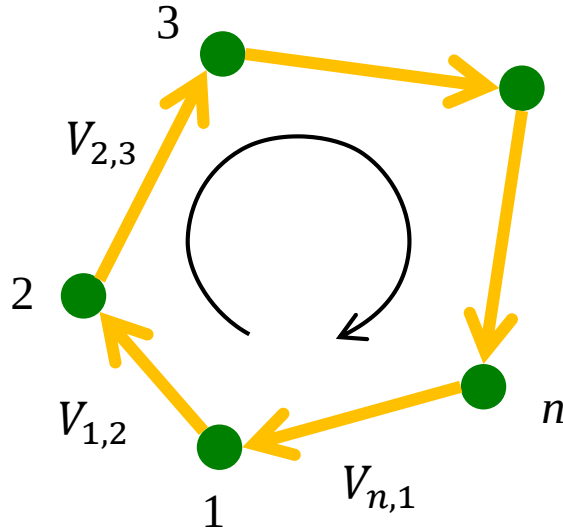
一般の閉経路に対しては、

$$\sum_{p, q} V(p, q) = 0$$

と表記すれば、気持ちが伝わるであろうか。

電圧は何かの高さ?

Kirchhoff's Voltage Law

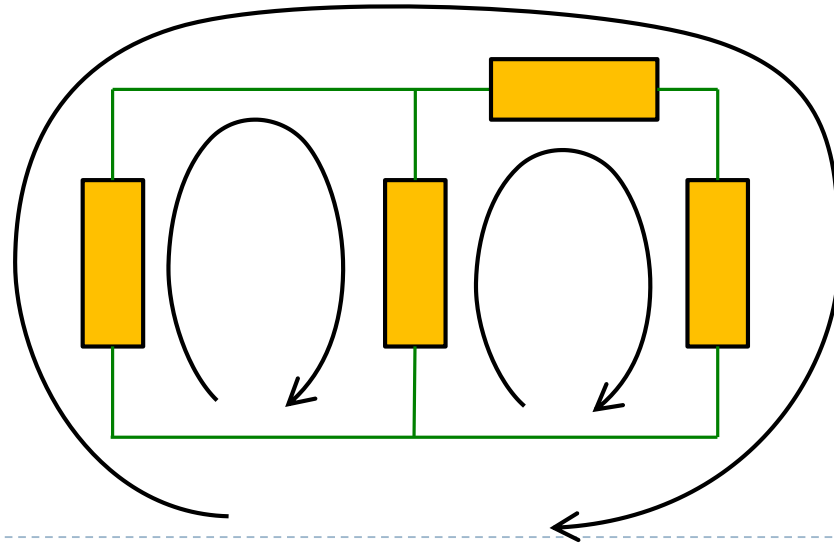


回路の任意の閉経路において、各点間の電位差の代数和(向きを考慮した電位差)は0になる。

$$\sum_{k=1}^n V_{k,k+1} = 0$$

なお、KVLを違う表現(Kirchhoffのオリジナルに近い形)で述べている文献の方が多い気がする。上の表現の方が、回路の気持ちが分かり易いと思う。

ちょっとした回路でも沢山の閉経路ができています。
一般に各箱は、異なる特性を持っている。どんなものがあるかを調べる前に、少し寄り道しよう。



Kirchhoffの法則は正しいか

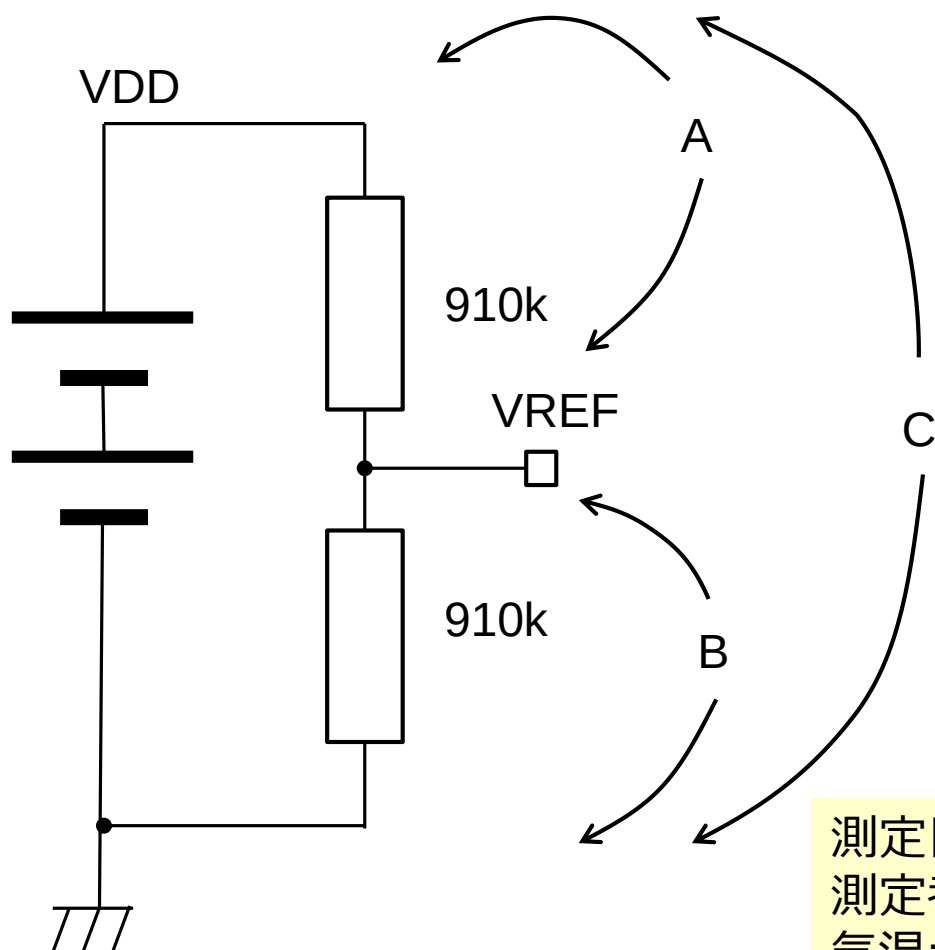
Kirchhoffの法則を実験で確認することを考えよう。

電圧は何で測るの? → 答えは電圧計

電流は何で測るの? → 答えは電流計

では、電圧計や電流計は、どのような理屈に基づいて表示値を正当性しているのだろうか。
電気回路の法則を使わずに、それらの動作を説明できるだろうか。
(鶏が先か卵が先か?)

抵抗直列回路でのKVT検証



(単位: V)

A	1.258
B	1.219
C	2.59
A+B	2.477

$A+B \div C \times 0.956$
期待値より4%程小さく出ている。

測定条件

測定日: 2018/8/27

測定者: 源代裕治

気温: 32.5°C 湿度: 53%

電源: Panasonic Evolta BK-3MLE

デジボル: AND AD-5523 デジタルマルチメータ

測定系

何があるか分からないので、測定条件は、無関係に思える項目も含め、出来るだけ詳しく記録しておく。

経験的に、担当者の名前が最大の情報量を持つ。

測定日: 2018/8/27

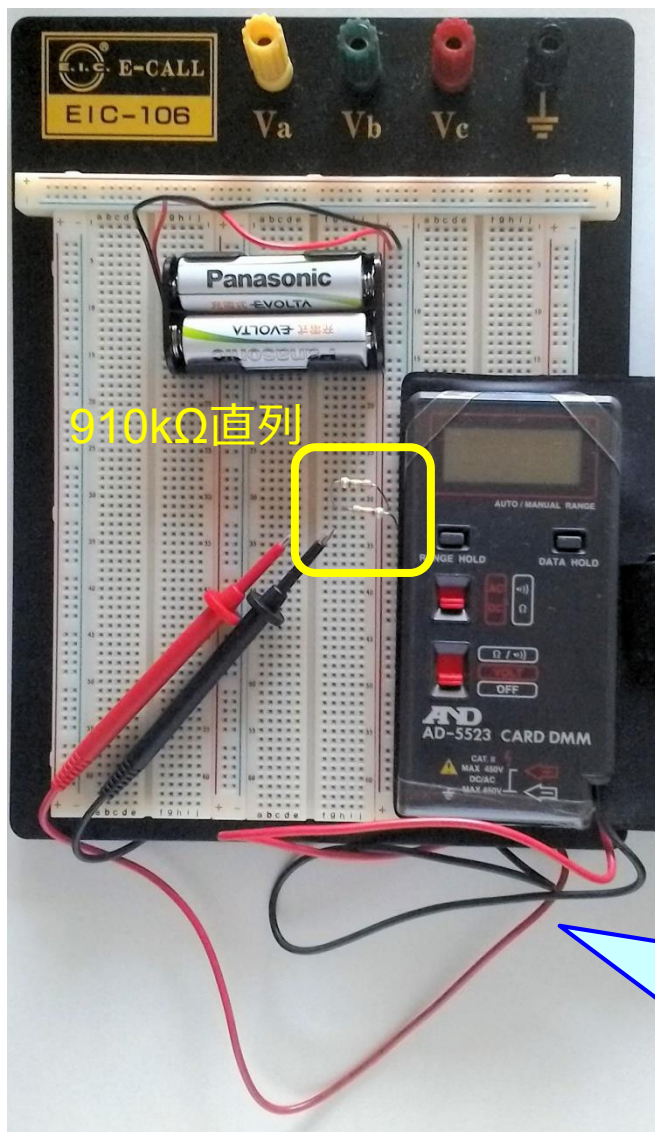
測定者: 源代裕治

気温: 32.5°C 湿度: 53%

電源: Panasonic Evolta BK-3MLE

デジタル: AND AD-5523 デジタルマルチメータ

スペックへのリンクがあると便利。
このデジタルはカタログデータでは
入力インピーダンス>10MΩ



写真は残しておく、後で役に立つことがある。
測定プログラムとか評価基板とかは、評価中ドンドン変化して行くものなので、記録の残し方に努力と工夫が必要である。

理論と実験が矛盾するときは、実験が間違っている

勿論、理論が間違っていることもある。

では、

世の中が自分の思い通りにならないときは、世の中が間違っている
というのはどうだ。

有限個の実験と無限個の理論があれば、実験と合う理論も無限にある。

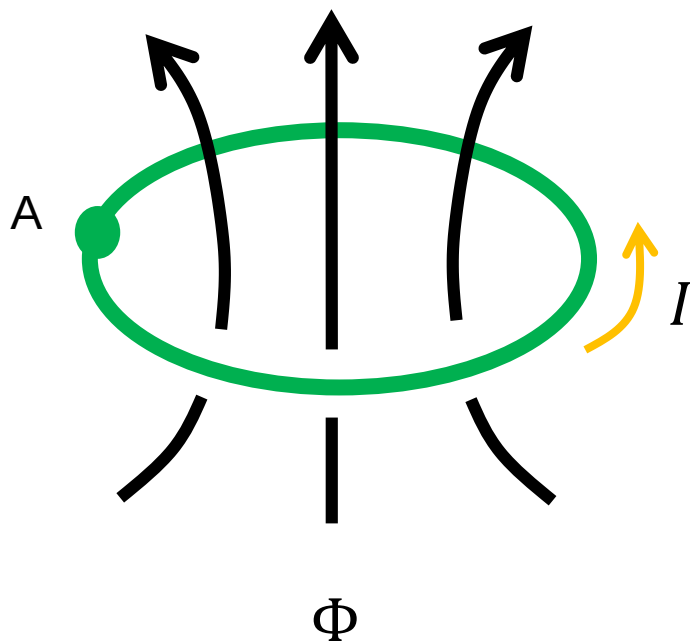
(伝 Niels Bohr)

Minkowskiの『部屋割り論法』に触発された発言と思うが、勿論間違っている。

事実が理論と合わない時、エンジニアは『寄生素子』をくっつけて辻褄合わせに走る。
それが正しい行動かは、効能に依って測られる。(pragmatism)
適切に配置された寄生素子は美しい。現象の枝葉を払い、本質を見せてくれる。
エンジニアの技量が問われる場面でもある。

閑話休題

ループに発生する電圧



ループの中を横切る磁束を Φ 、ループ一周の抵抗を R とする。電磁誘導の法則から、ループを流れる電流を I とすると、

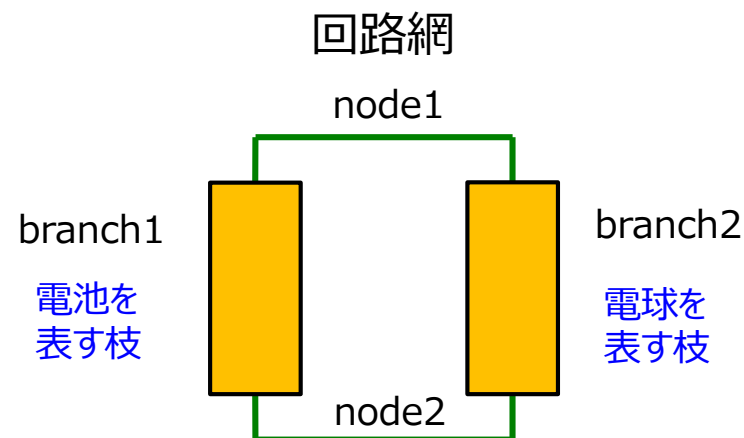
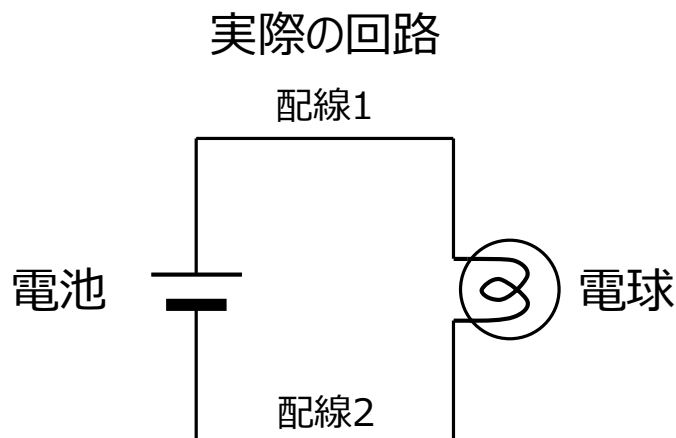
$$RI = -\frac{d\Phi}{dt}$$

が成り立つ。すなわち、A点を基準として時計方向に電圧を測ってゆくと、一周して戻ってみると RI だけ電圧が変化していることを示している。これから、ループ内の電圧はポテンシャルではないと言える。

KVLとの矛盾は、どう解釈すべきだろうか？

電子回路の形式化

抽象化とも呼ばれるが、むしろ**単純化**である



電子回路は部品と、それらをつなぐ配線からできている。そこで、各部品をまずは箱で置き換え、それらが持つ色々な機能は、箱の属性として付け加える、と定式化する。

シミュレーションプログラムはこのように構成されている。

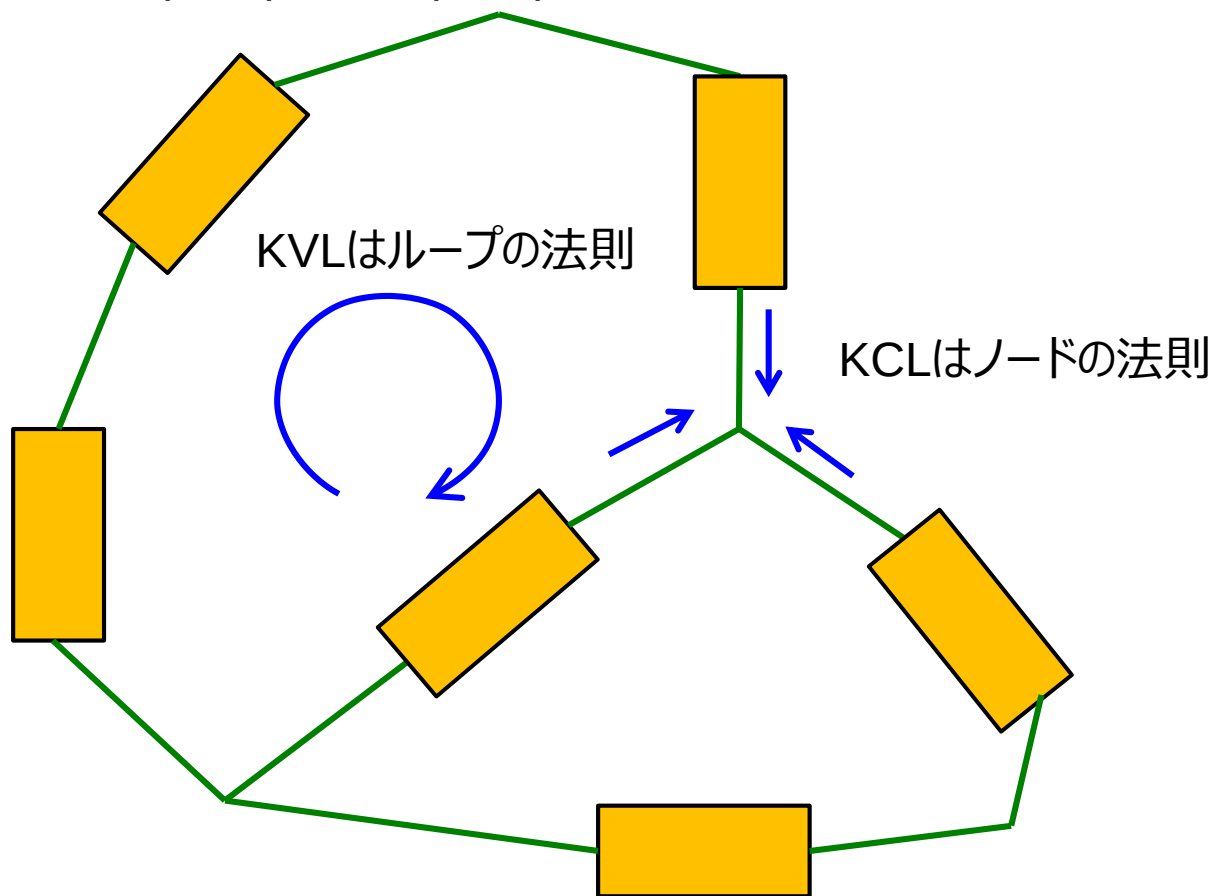
回路網は両端に端子を持つ**枝(branch)**と、端子間を接続する**節(node)**とからできている。

配線を節と捉えると、つながっているかどうかだけの情報として抽象化されているので、長さ方向に広がっているという感覚は消失する。(配線ではなく配点になってしまう) 一方、枝の方は箱よりは線で書く方が楽だったりする。このように、回路網は回路の感覚とは反対の所がある。

電子回路を回路網として捉える時は、**node内では同一電圧**、**branchは電流一定**(入った電流がそのまま出て来る)と単純化している。

回路はグラフだ

回路網はブランチ(部品)をノード(配線)で結合したグラフと見做すことができる。
すると、

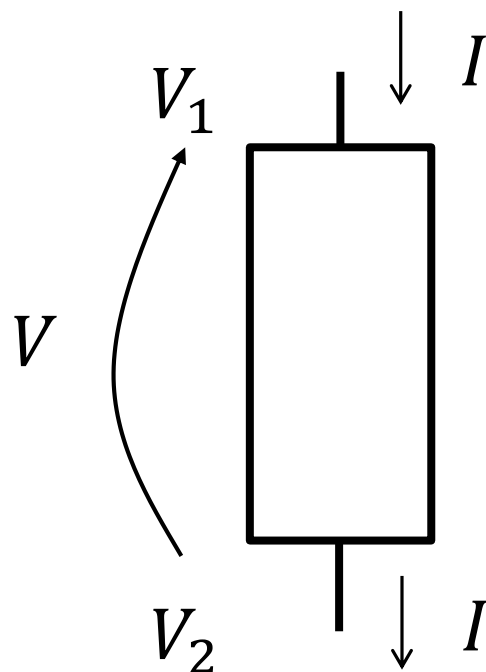


回路は、Kirchhoffの法則で規定される接続情報に、各ブランチが持つ電流対電圧特性 (IV特性)によって動作が決まる。ではIV特性(=ブランチ特性)としては、どのようなものがあるか、見て行こう。

『オームの法則』って何？

この法則も、長い歴史の中で『再定義』されてきた。Ohmが見出した法則が電気の歴史の中で大きな影響を与えて来たことは十分に認識すべきだが、回路をグラフと見る立場からは、その原型を知ることには大した意義はない。

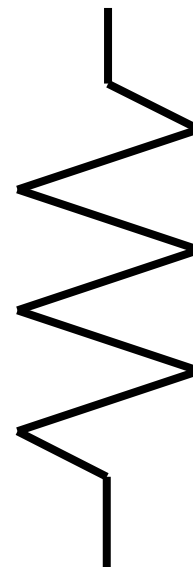
抵抗ブランチ



$$V = V_1 - V_2$$

$$V = RI$$

記号



電圧が電流に比例するブランチを**抵抗**ブランチという。その比例係数を抵抗値と呼ぶ。

良く使われるので、専用記号を用意すると便利である。ほとんどの場合、上図に準じた記号が用いられるが、旧規格である。

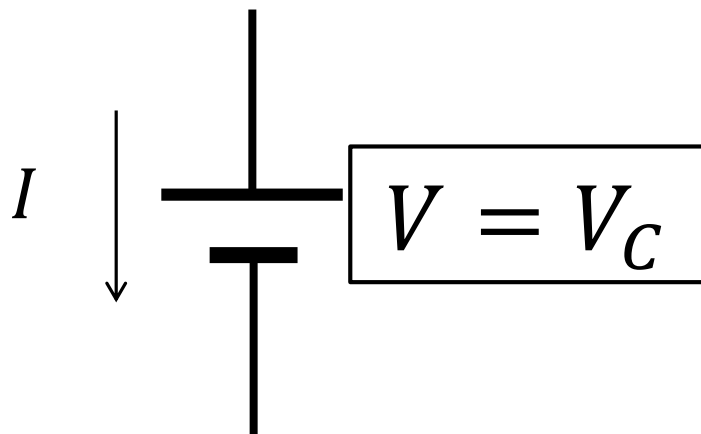
旧 JIS C 0301 (1952年4月制定)

新 JIS C 0617 (1997-1999年制定)

ただし、旧規格の方が圧倒的な支持を得ている。

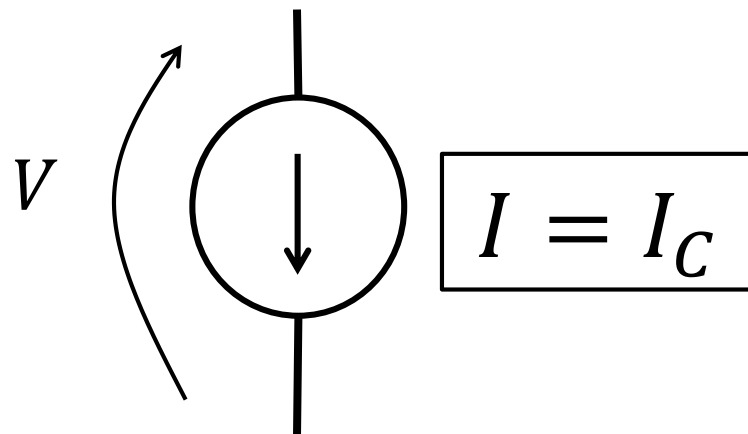
Ohmの法則は、回路論の立場からは抵抗の定義である。

電圧源



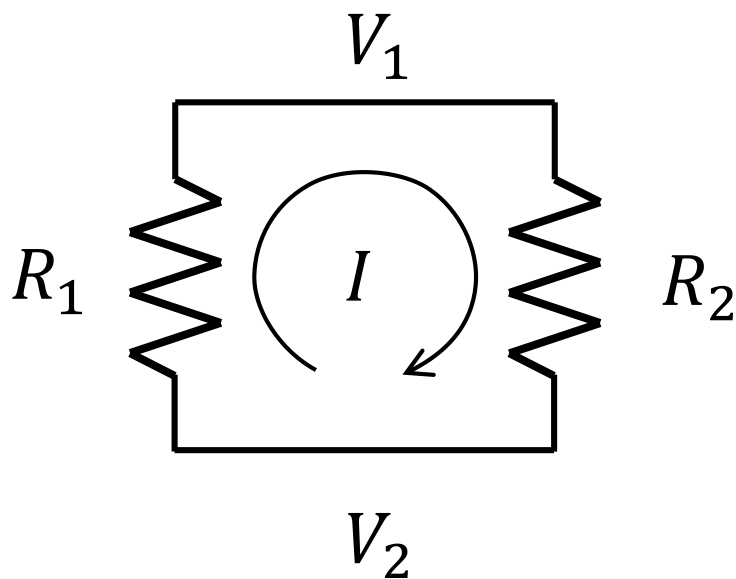
電圧が電流に関わりなく一定であるブランチを**電圧源**ブランチという。
いくら電流を流しても電圧が変わらない点で、電池の理想化である。電流を流し込んでも電圧は変わらない特性がある。
専用記号としては、時間的に変化しない電圧源に対しては、上図が用いられることが多い。

電流源



同様に、電流が電圧に関わりなく一定であるブランチが考えられる。これを**電流源**ブランチという。
このブランチはどんなに電圧を掛けても流れ込む電流が変わらない特性がある。
常用される記号がいくつかあるが、上図が良く用いられる。

Kirchhoffの法則は十分か



左に回路では、KCLより R_1 と R_2 に流れる電流は等しく逆向きになる。他方、両端電圧はそれぞれ等しい。

そこで、 R_1 ブランチが満たす式は

$$V_2 - V_1 = R_1 I$$

同様に、 R_2 ブランチが満たす式は

$$V_1 - V_2 = R_2 I$$

となる。これらを連立した場合、もし

$$R_1 = -R_2$$

だと解が一つに決まらないことになる。

問題:

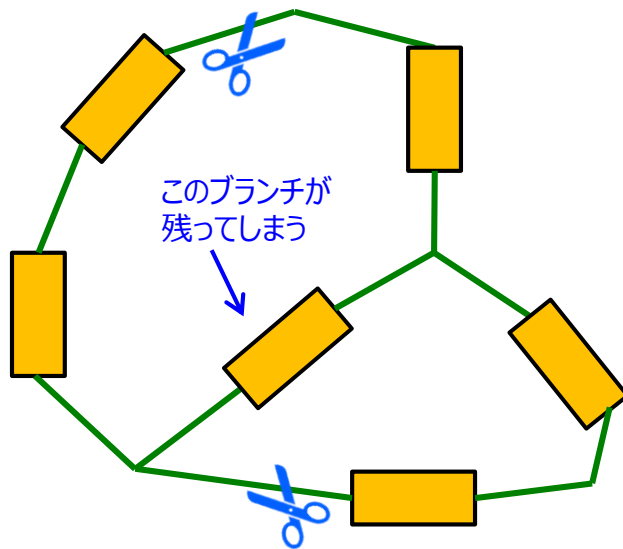
Kirchhoffの法則が十分になるためには、どのような規則を追加するのが良いだろうか。

c.f. P. Feldmann, R. A. Rohrer, "Proof of the number of independent Kirchhoff equations in an electrical circuit," IEEE Transaction on Circuits and Systems, Vol. 38, No. 7, pp. 681-684, July 1991.

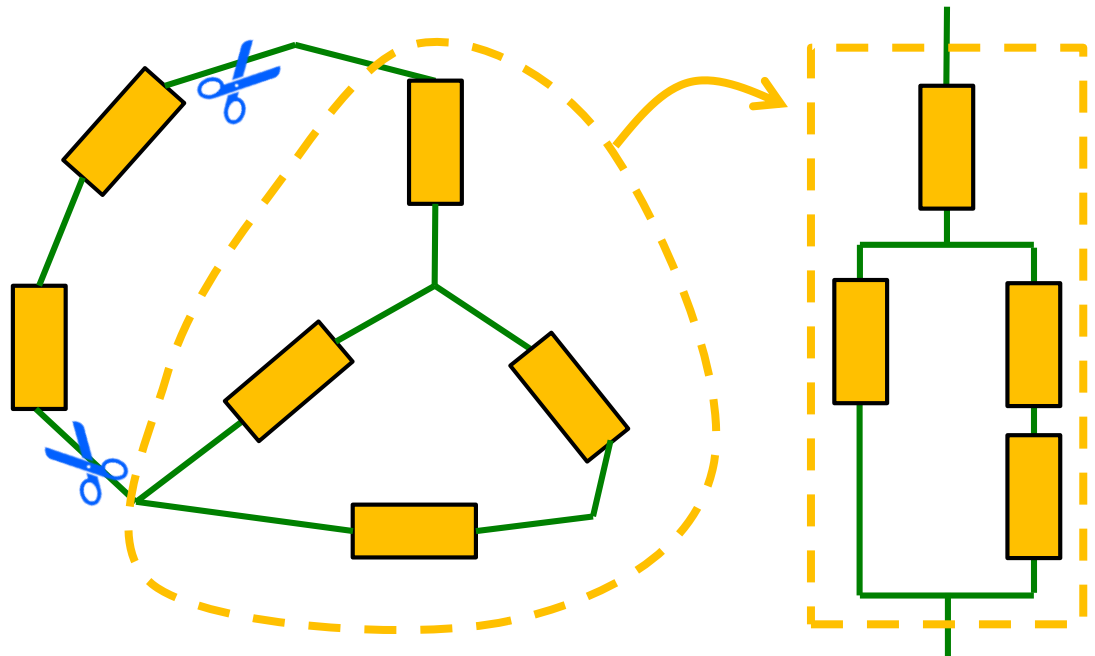
等価な回路網

回路網を、どこか2か所のノードを切り離したとき、回路網が分離されることがある。その場合、分離された回路網をひとつのブランチ(合成ブランチ)と見做すことができる。(なぜ)

分離できない場合

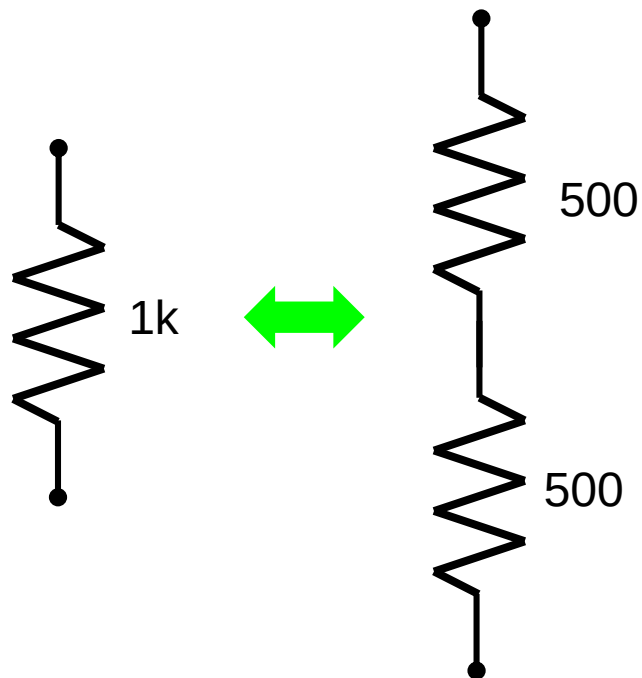


分離できる場合

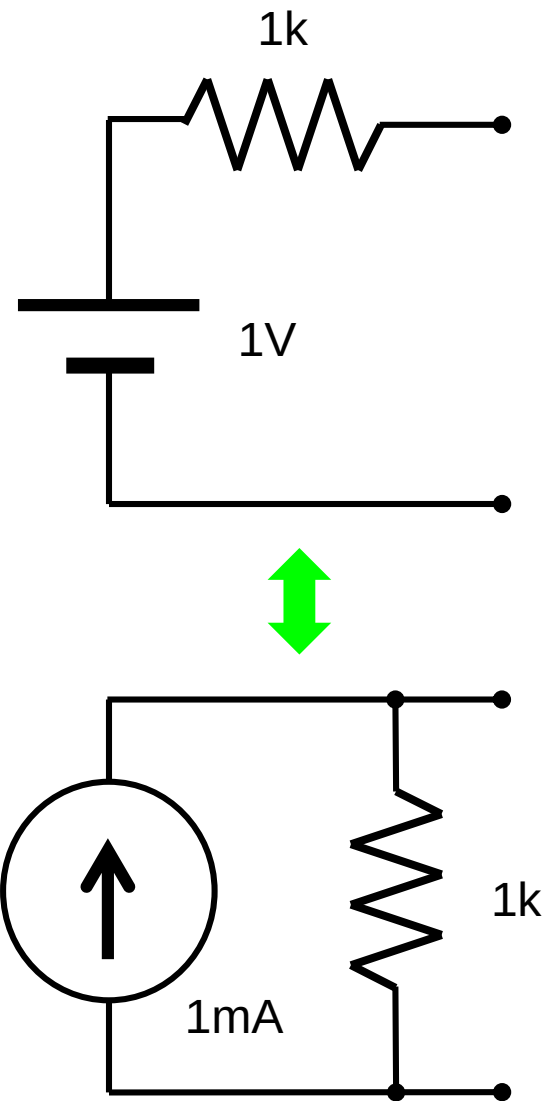


異なる合成ブランチが、同じIV特性を持つことがある。それらは置換えても、全体としての回路特性は変わらない。こうして、**等価な回路網**、という重要な概念に至る。

回路網の等価な回路網の例

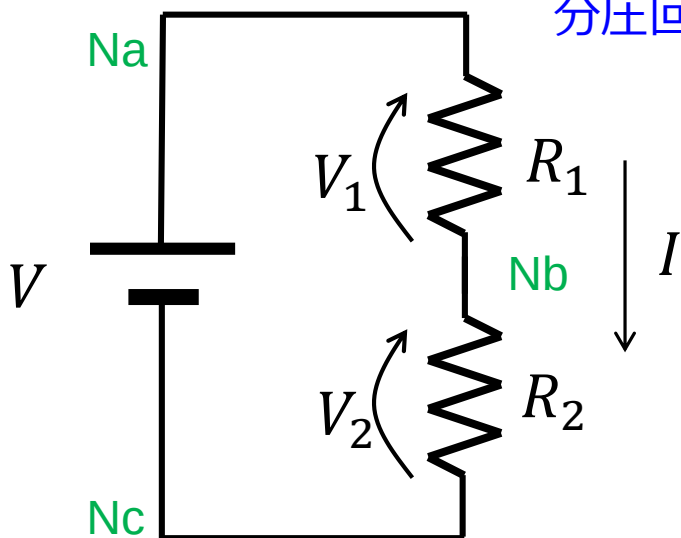


これらが等価なブランチであることは、
どのようにして確認できるだろうか。



直列抵抗、並列抵抗

分圧回路



ノードNbのKCLから R_1 と R_2 に流れる電流は共に I である。Ohmの法則より $V_1 = IR_1, V_2 = IR_2$ である。KVLから、Na-Nc間の電圧 V は、

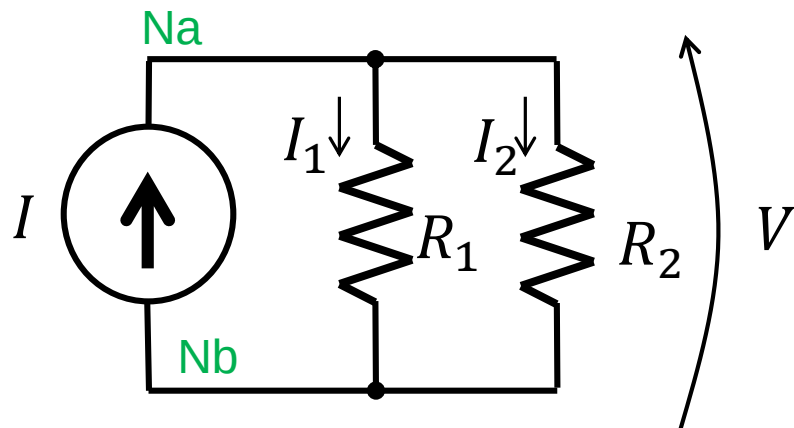
$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 \\ &= IR_1 + IR_2 \\ &= I(R_1 + R_2) = IR \end{aligned}$$

すなわちこの直列抵抗は

$$R = R_1 + R_2$$

の単一抵抗と等価である。

分流回路



KVLから、 R_1 と R_2 の両端電圧は共に V である。Ohmの法則より $I_1 = V/R_1, I_2 = V/R_2$ である。NaでのKCLから、

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 \\ &= V/R_1 + V/R_2 \\ &= V(1/R_1 + 1/R_2) = V/R \end{aligned}$$

すなわちこの並列抵抗は

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2$$

の単一抵抗と等価である。

抵抗、あるいはコンダクタ?

直列回路 → 抵抗値の和
並列回路 → 抵抗値の逆数の和の逆数



ここで、電圧に比例する電流を流すブランチを考える。

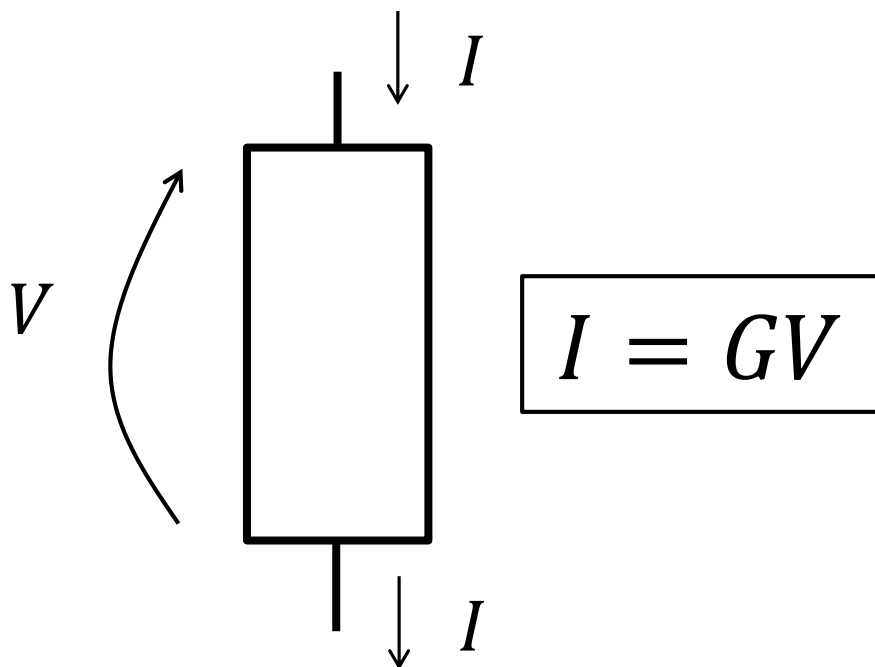
このIV特性を持つブランチを

コンダクタ(conductor)

と呼ぶ。パラメータ G をコンダクタンス(conductance)と言う。

$$G = 1/R$$

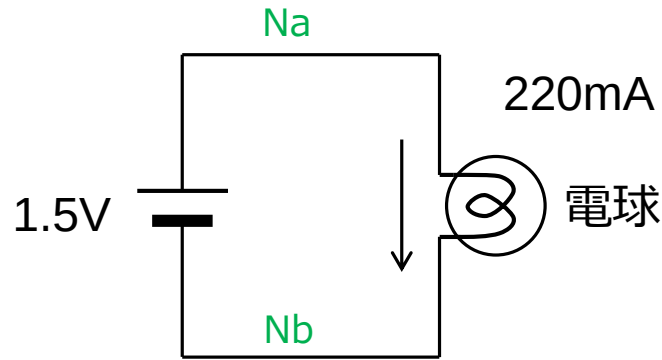
の関係が成り立つので、抵抗に対するOhmの法則を書き直ただけに見えるかも知れない。その理解で良いのであるが、コンダクタという概念を用いると、色々便利なことがある。例えば、



→ コンダクタの並列接続コンダクタンスは、各コンダクタンスの和である。

みたいな表現が可能である。この表現は、3並列とか4並列とかになっても変えなくて済む。

豆球の抵抗は？



ある豆電球では、1.5Vの電圧を与えた時に220mAの電流が流ることが観測された。この時、豆電球の抵抗 R はOhmの法則を使うと、

$$R = \frac{V}{I} = \frac{1.5\text{V}}{220\text{mA}} = 6.8\Omega$$

と求まる。が、これは妥当な推論だろうか。

通電中に抵抗を測ってはいけない。

ちなみに、電池を外して豆電球の両端の抵抗を測定したら 1.0Ω であった。この不一致は、どう考えるべきだろうか。

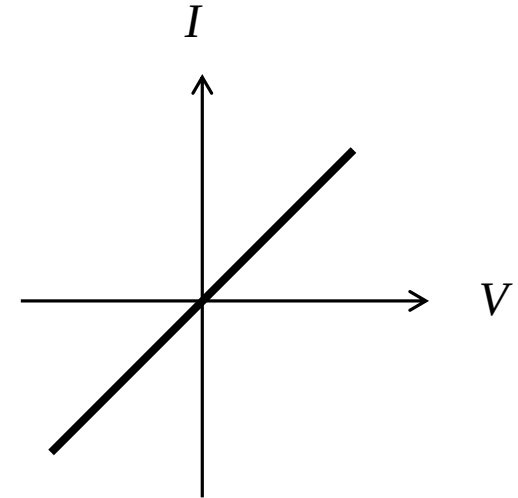
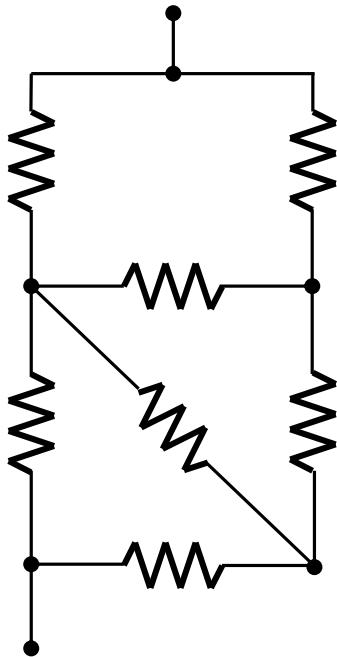
言うまでもない注意であるが、時々やらかしてしまう^^;)

抵抗のみから構成される回路網

抵抗のみからなる回路網は、ある一つの抵抗ブランチと必ず等化である。
これを**合成抵抗の定理**と呼ぼう。

例えばこんな抵抗網でも、

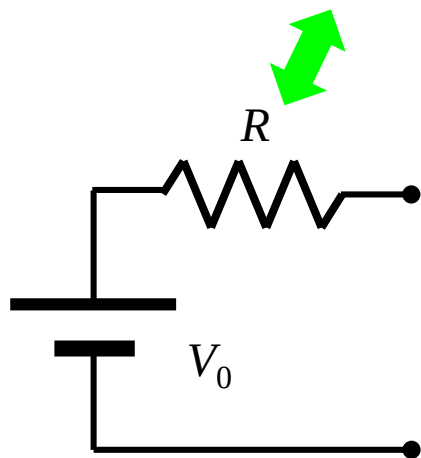
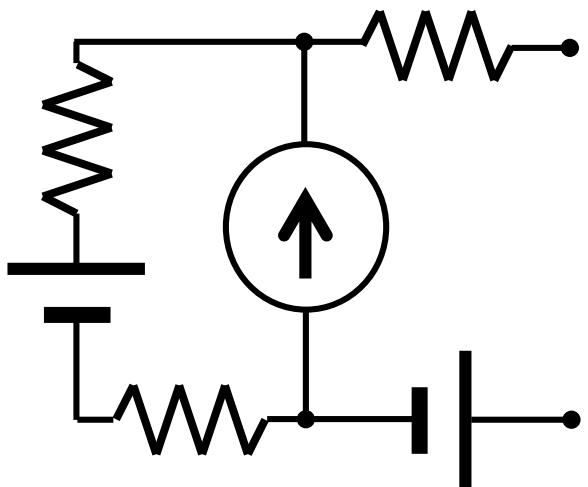
一本の抵抗と等価である。



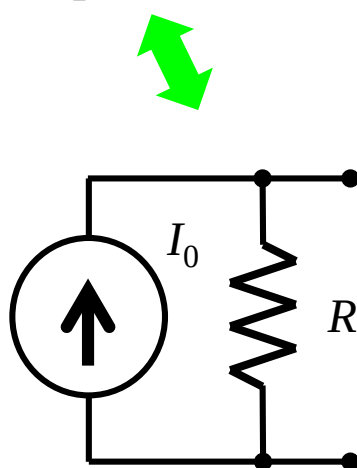
グラフ理論に基づいた証明は難しい。
が、回路屋的感性では、
抵抗しかない回路のIV特性は原点を通るであろう。また比例関係があるに違いない。とすると、それはひとつの抵抗で実現できる、と把握する。

電圧源、電流源を含む場合の等化な回路網

例えば適当に書いたこんな回路でも

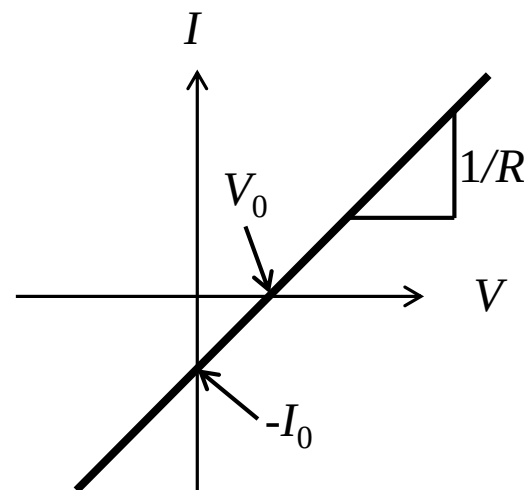


Thevenin equivalence



Norton equivalence

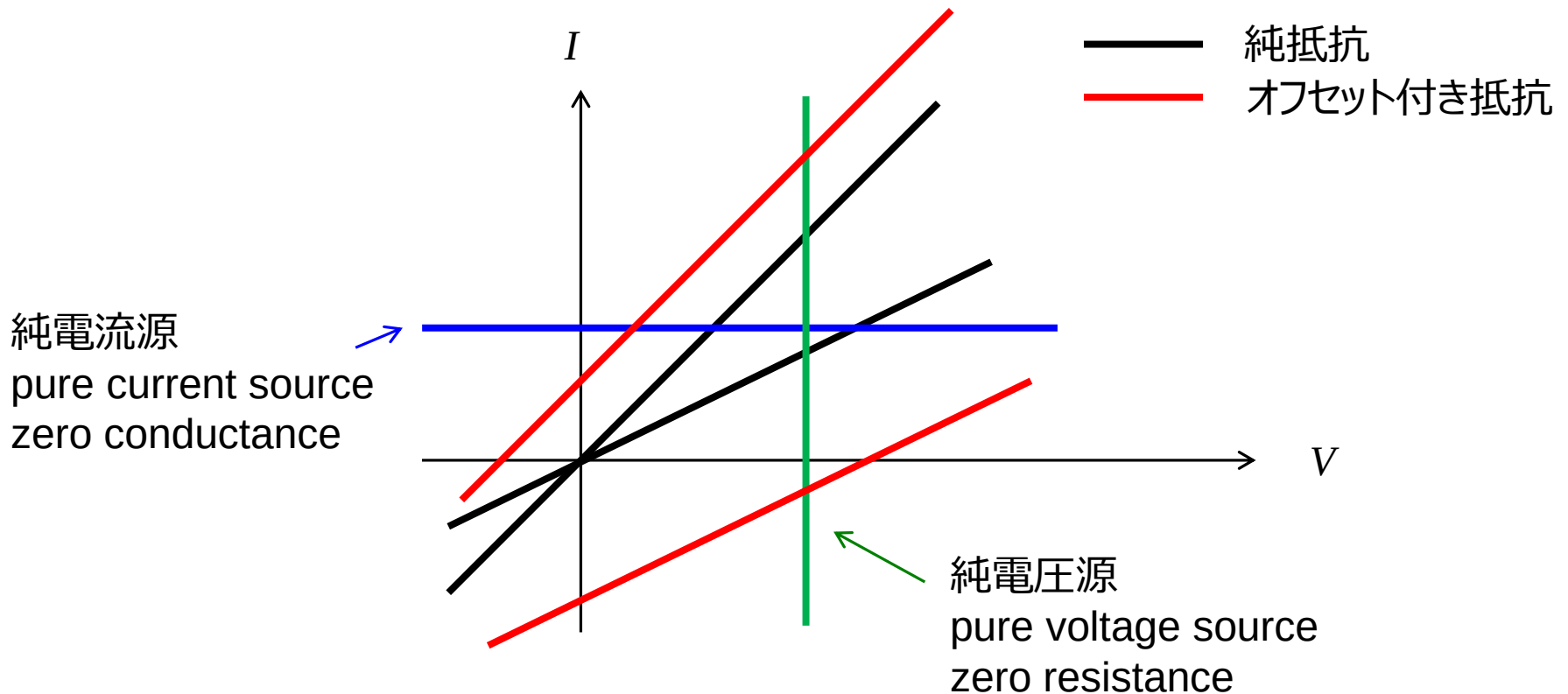
IV特性は直線になる筈だ。



電源があると原点を通らなくなるが、
・ x切片の電圧源と傾きに対応する抵抗
(Theveninの定理)
もしくは
・ y切片の電流源と傾きに対応する抵抗
(Nortonの定理)
で表せる。

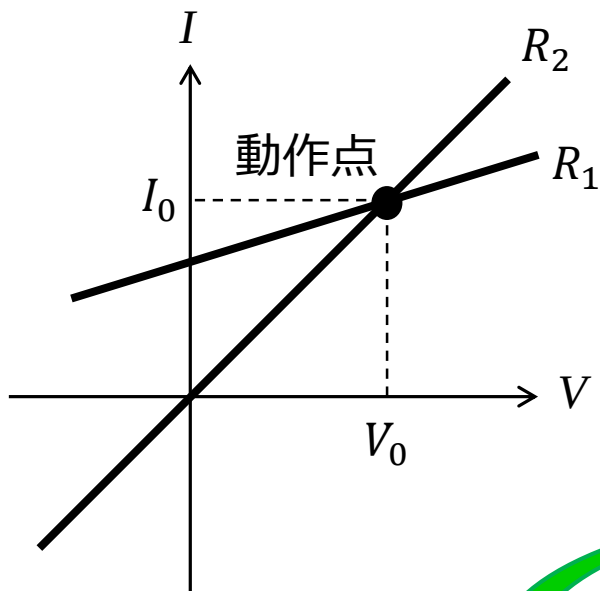
オフセット付き抵抗

ここまで出て来た範囲のブランチは全て、IV平面上の直線で表される。
いわばオフセット付き抵抗である。(この範囲外の線形ブランチも、そのうち扱う。)

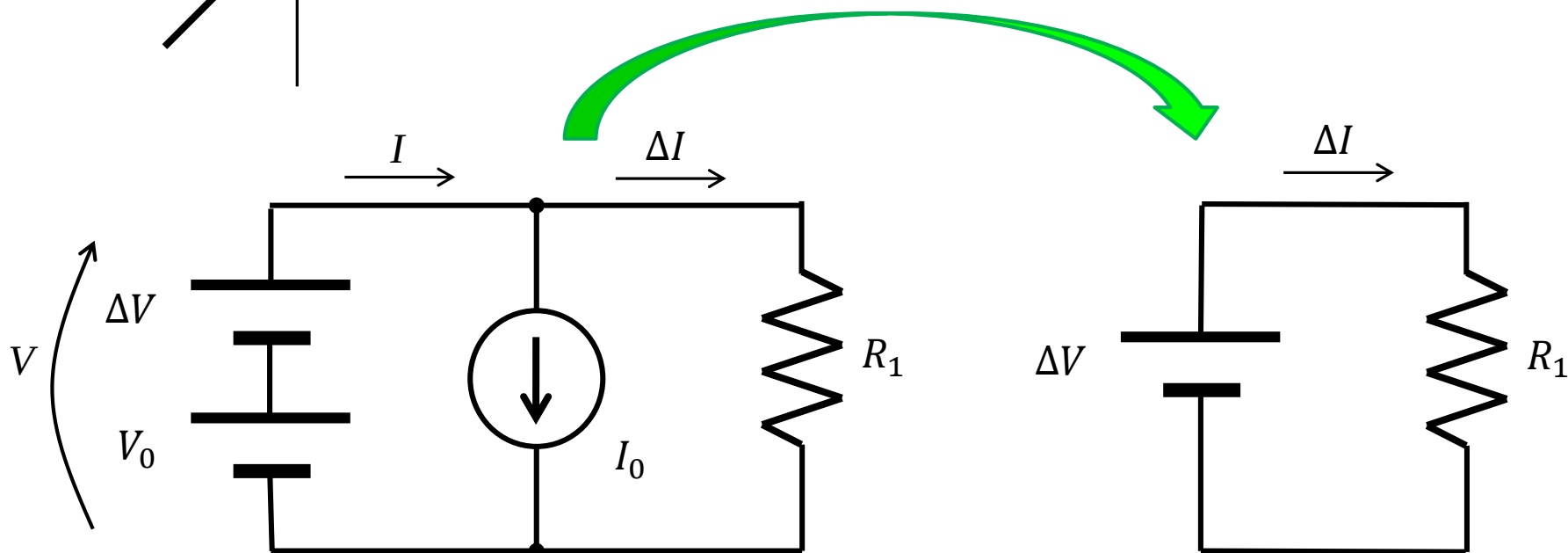


直線の傾きは、正または純電流源を最低の0とする。
負の傾きを持つブランチは負性抵抗と言う。Kirrhoffの法則からは排除する理由がない。
(もし排除したいなら、追加で別の法則を要請する必要がある。)

局所線形化



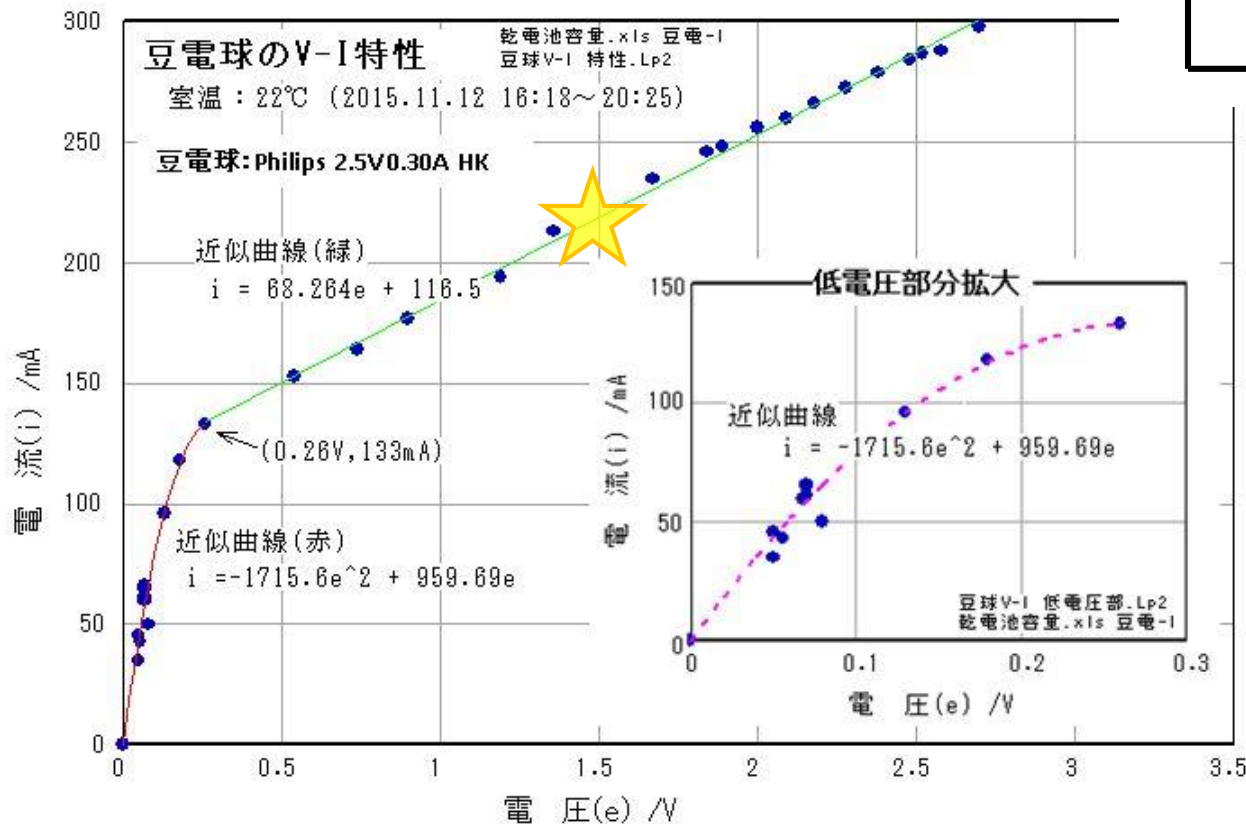
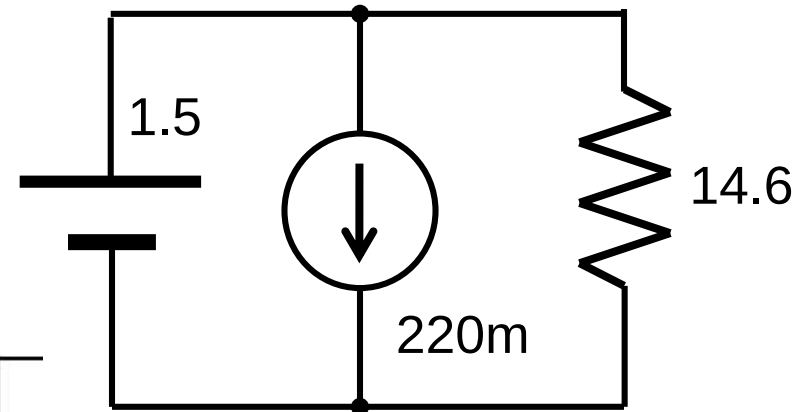
IV特性が原点を通らない場合を考えると、ブランチの電圧と電流が、ある**動作点**で同じであるからと言って、等価なブランチとは限らない。左図のように、動作点からの変化率が異なるかも知れないからである。 R_1 の直線は左下の等価回路になるが、動作点からの変化量にだけ着目すると、右下図のように簡単化できる。回路を読むときに多用する手法である。



豆電球の等価回路

局所線形化

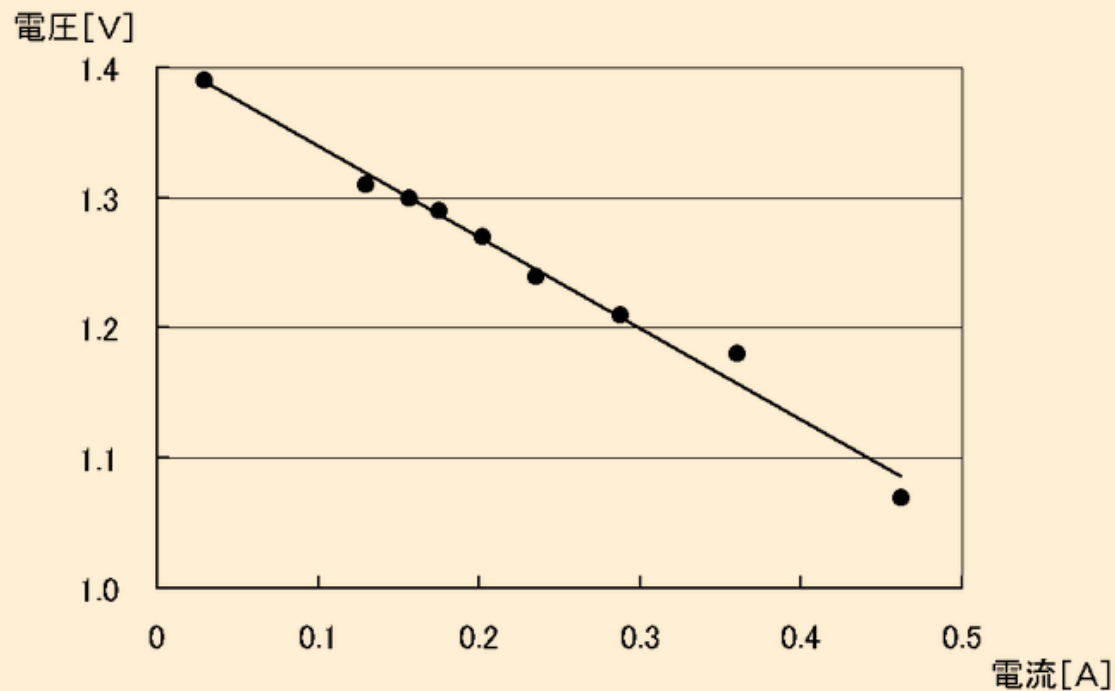
電球はOhmの法則に従わない。
しかし動作点周りでは、電流源と抵抗の並列
回路で良く近似できる。
そこで、点灯時のこの豆電球の等価抵抗は
 14.6Ω である、と言える。



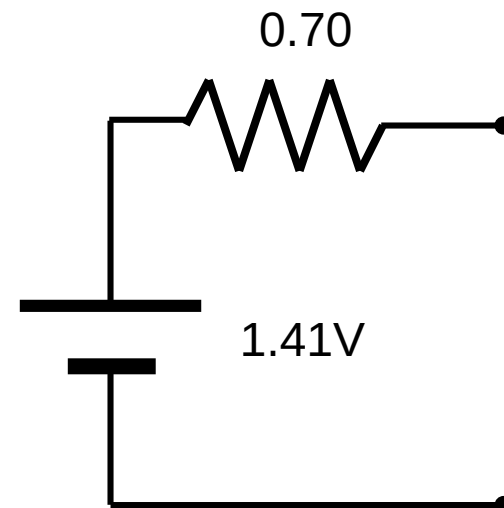
動作点周りでIV特性を直線
近似する**局所線形化**は、ト
ランジスタなどのアクティブ素
子を含む回路を読むのに、
必須とも言える手法である。

電池の内部抵抗

<http://www.aichi-c.ed.jp/contents/rika/koutou/buturi/bu8/teikoukito/naibuteikoh.htm>



(図4 実験例)



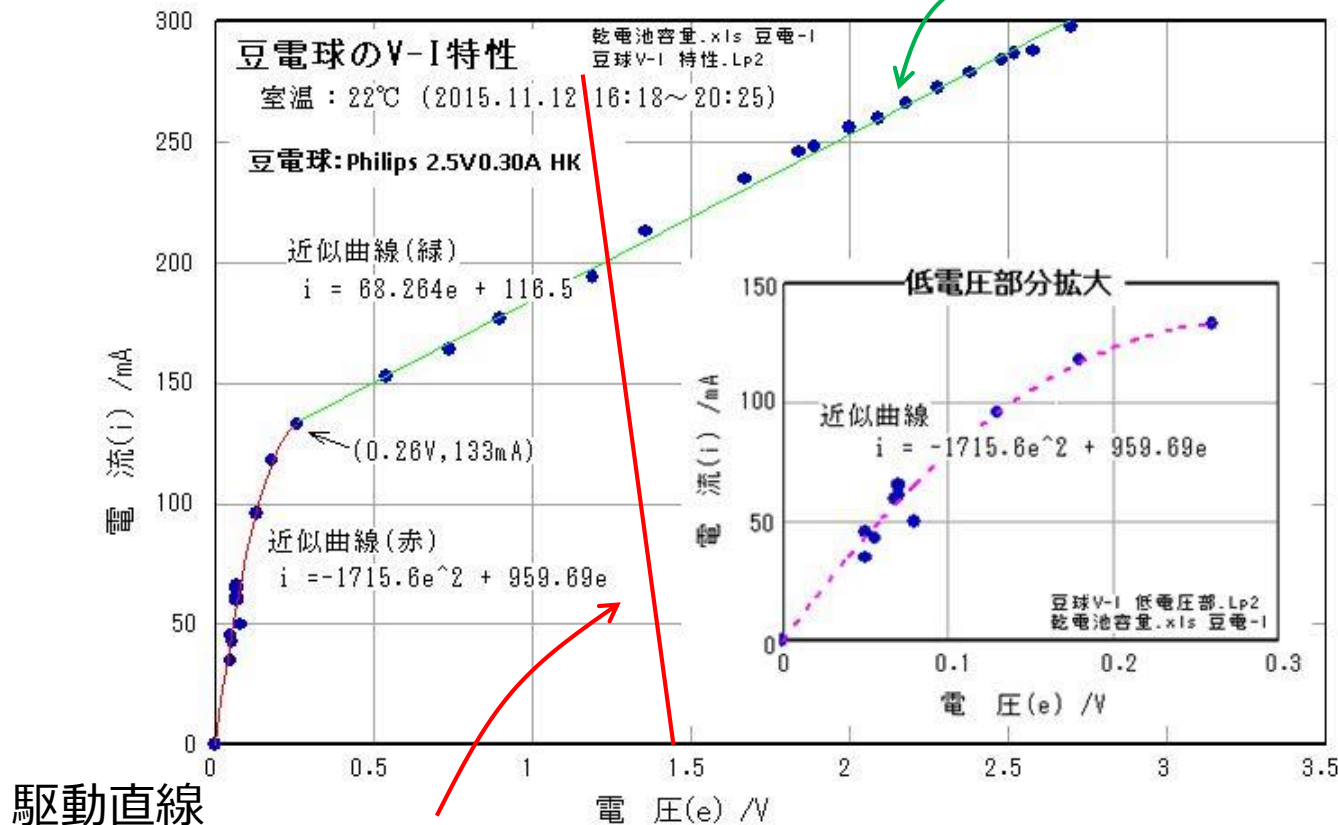
理想電圧源は、内部抵抗が0と理想化した電池と考えられる。
同様に、理想電流源はコンダクタンス(抵抗の逆数)を0と理想化した電流源である。

豆電球駆動回路の動作点

ランプと電池の特性を重ね合わせプロットすると、その交点が動作点になる。

負荷直線

$$I = 0.068264V + 0.1165$$



問題:
駆動直線は負性抵抗
になっている。なぜか。

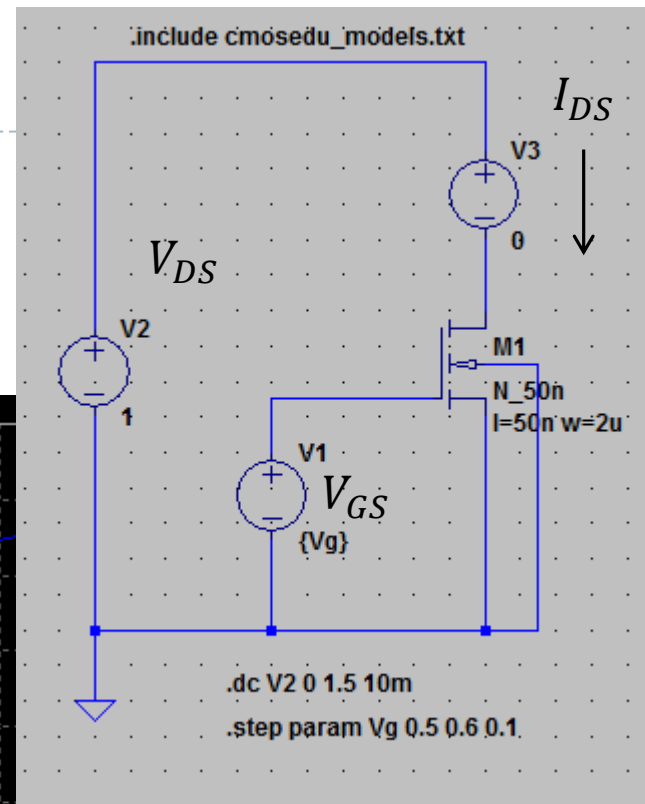
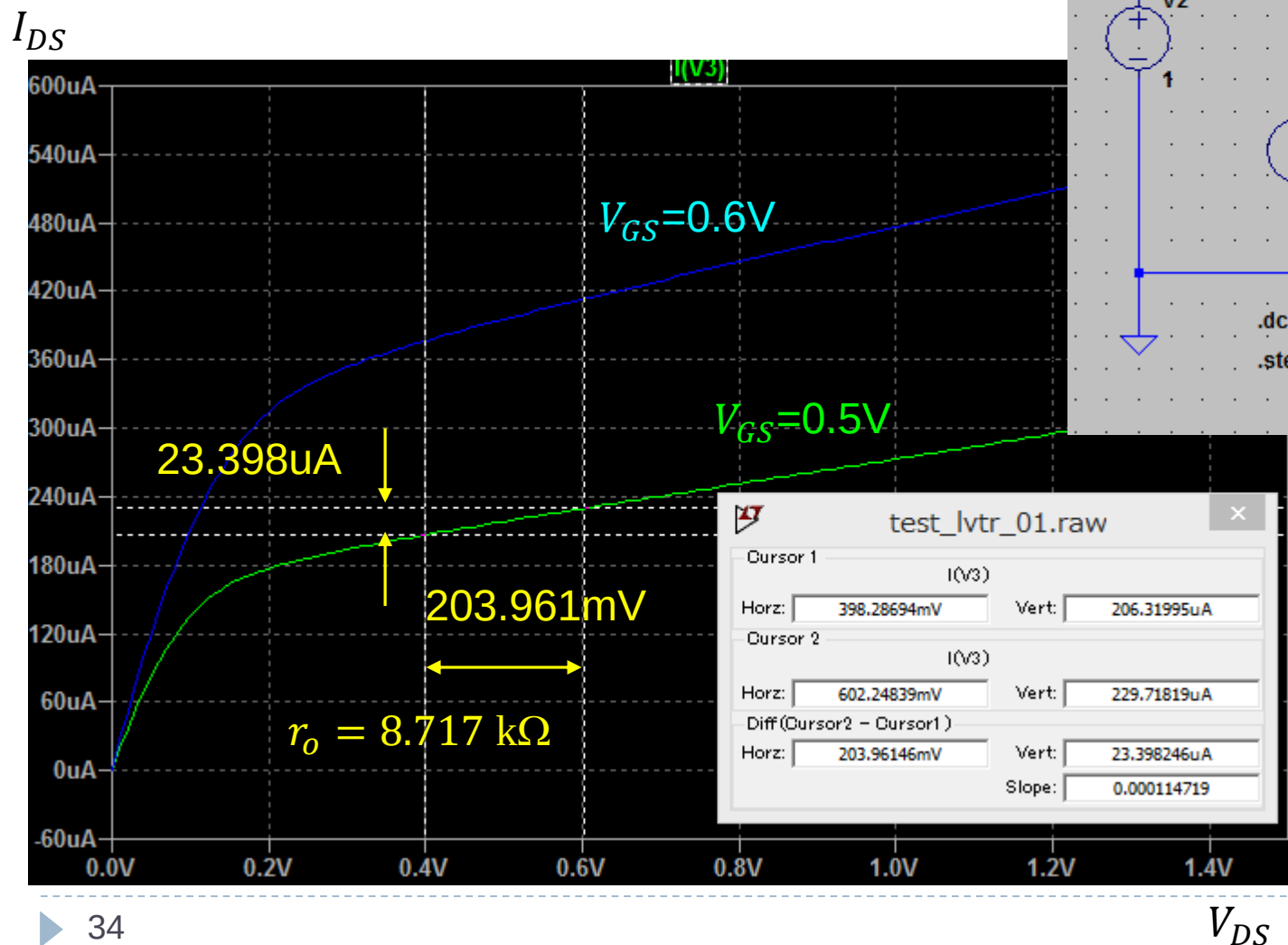
駆動直線

$$0.70 I = 1.41 - V$$

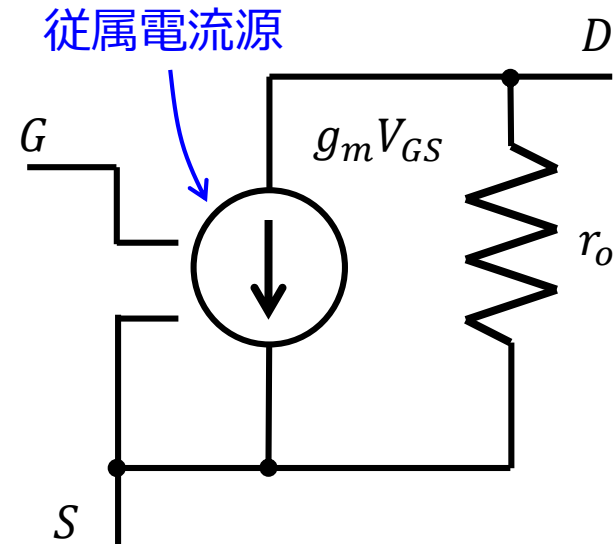
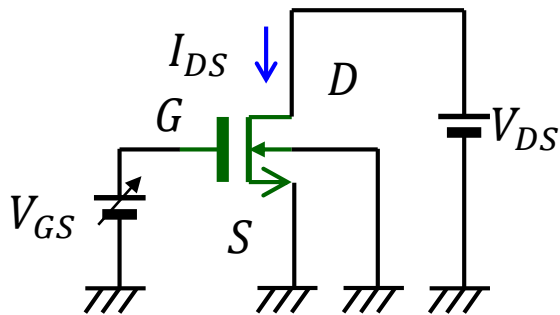
図的解法は、非線形 Branche でも有効である。が、交点精度は出しにくい。それぞれを線形近似し、連立方程式を解くと、
 $I = 203\text{mA}$, $V = 1.27\text{V}$ と求まる。

MOS TrのIV特性

Baker, "CMOS 3rd Ed.," IEEE Press, 2010.
のshort channel NMOSモデル



MOS Trの等価回路



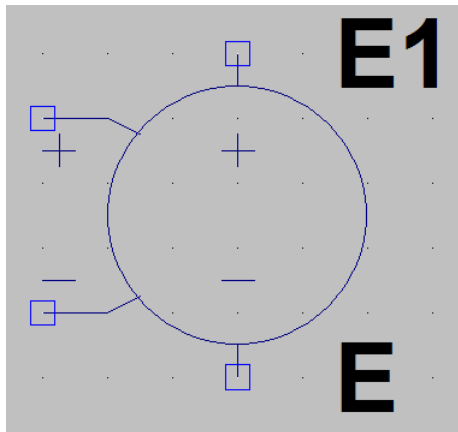
MOSトランジスタは動作点まわりで、Norton equivalenceを用いると良い。ここで、その出力電流 I_{DS} は、入力電圧 V_{GS} によって決まる従属電源ブランチである。このようなブランチをVCCS(Voltage Controlled Current Source)と呼ぶ。

従属電源ブランチ

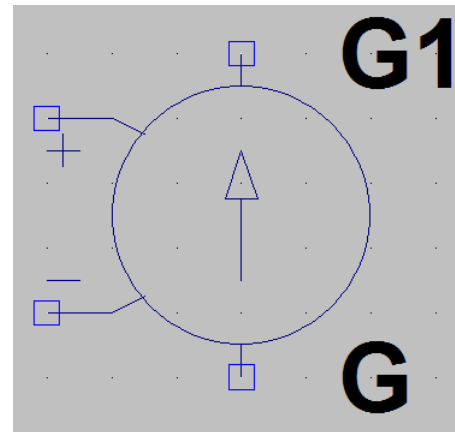
記号はLTspiceのもの。
デバイスの先頭文字割り当ては、Spiceでの決まり

他所の電圧や電流をパラメータとする電源ブランチをdependent sourcesと称する。
実回路図には存在しない仮想的な素子である。シミュレーションで(シミュレータ内部でも)多用する。

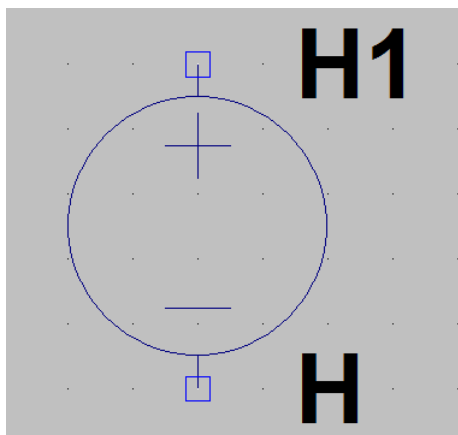
VCVS: Voltage Controlled Voltage Source



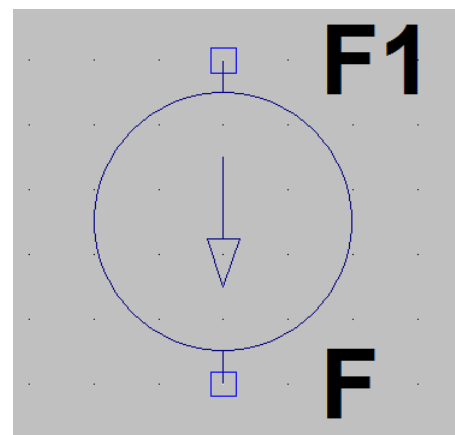
VCCS: Voltage Controlled Current Source



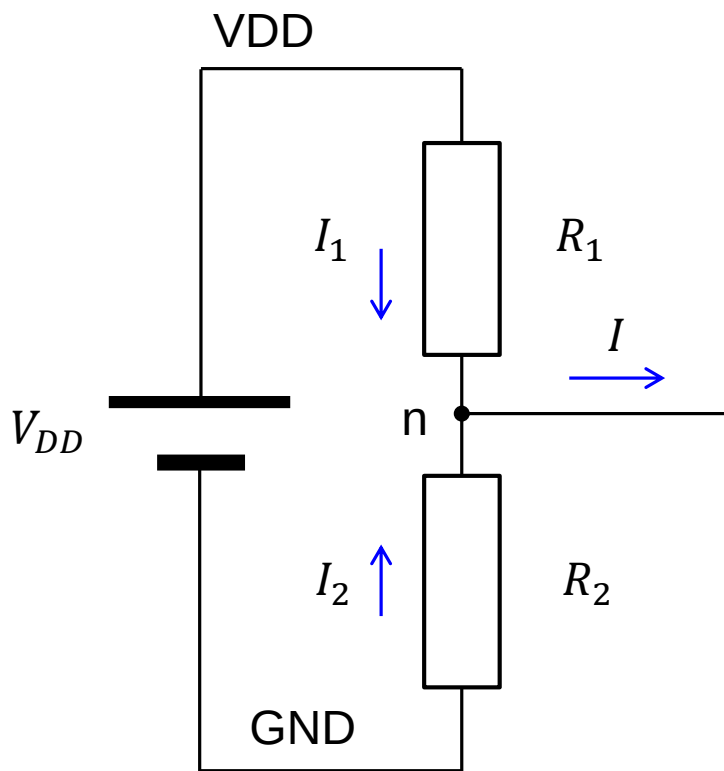
CCVS: Current Controlled Voltage Source



CCCS: Current Controlled Current Source



電流はどちら向きに流れるか

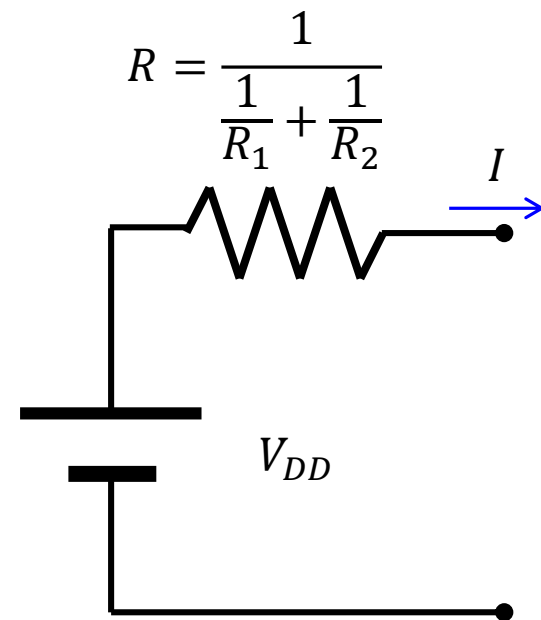


上図の状況では I_2 はGNDから V_{DD} の方向に流れる。動作点からの変化分を考えると、電源とGNDはショートされている(同電位)と見做す。

左図の分圧回路を考えよう。抵抗に流れる電流は下向きに $V_{DD}/(R_1 + R_2)$ である。常識的に、電流は低きにながれるものであるから、電圧が低い側から高い側に電流が流れることはない。

ここでノードnから電流 I を引き抜くことを考えよう。その時、ノードnの電圧は変化どれだけ変化するであろうか。また、電流 I はどのように分流して行くであろうか。

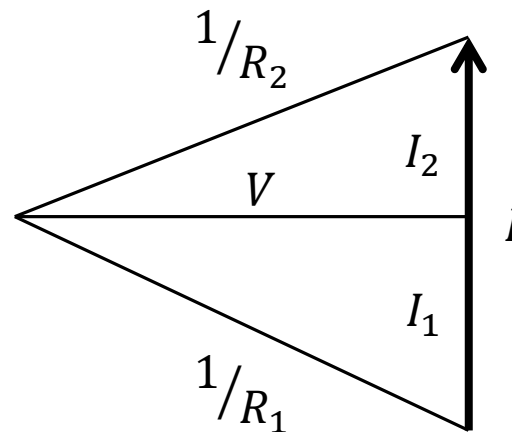
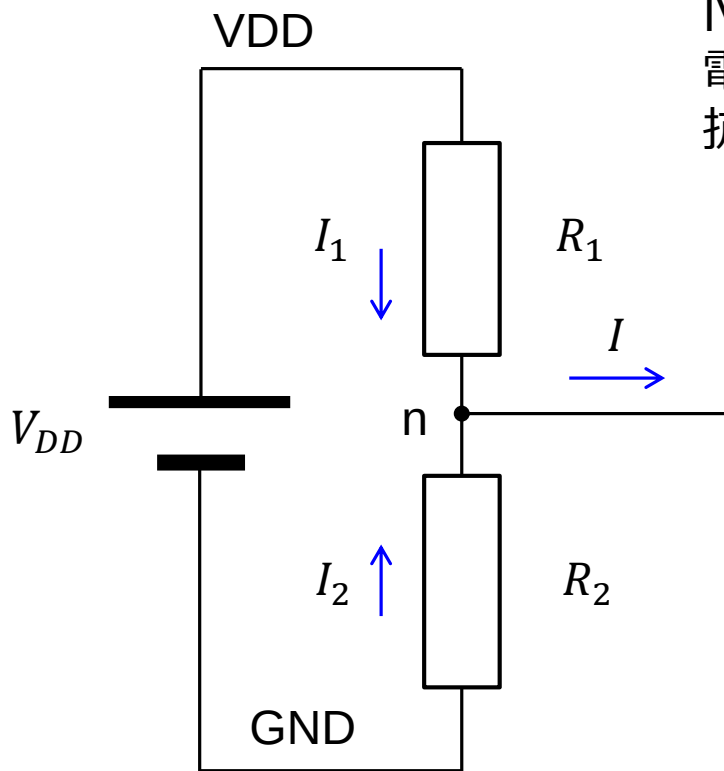
並列抵抗にThevenin equivalenceを用いると、ノードnの電圧が分かる。そこから各抵抗に流れる電流を求めて、変化分を計算する手もあるが、



並列抵抗の図的解釈

IVプロットの発想を使おう。

電圧変化 V により左図の方向に、抵抗 R_1 には I_1 が、抵抗 R_2 には I_2 が流れるから、下図が成り立つ。



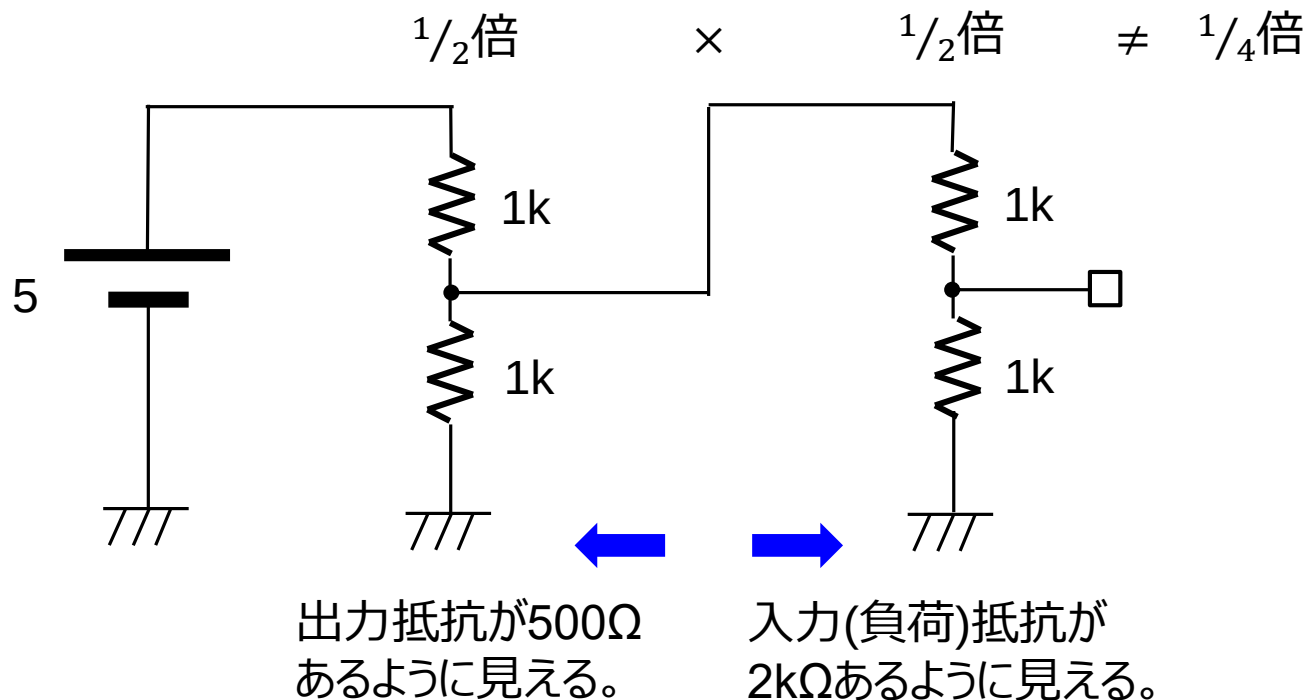
分かっているものから図を描いて行くと、

- 縦向きに電流 I の矢印を引く。
- I の上端から $1/R_2$ の直線を、下端から $-1/R_1$ の直線を引く。
- その交点の横幅が電圧変化 V 、 I の分割が I_2 と I_1 になる。

変化分に関しては、 Δ を付けたり小文字で i や v と表記することが多いが、回路を鑑賞する時には特に区別しない方が、思考の節約にはなる。

分圧回路の縦列接続

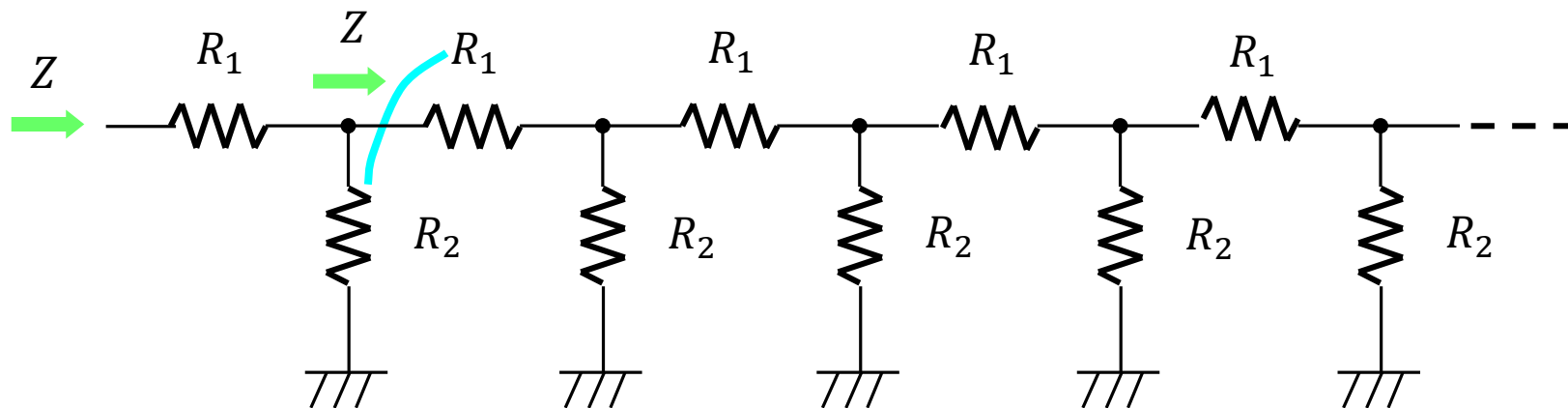
分圧回路を縦列に接続したとき、合成された分圧比はそれぞれの分圧比の積にはならない。
この事実を、良く知っていると思う。



比を保ったまま抵抗値をドンドン小さくして行くと、負荷が少々小さくなくても出力電圧が余り変わらないようにできる。すなわち、駆動能力が増える。

比を保ったまま抵抗値をドンドン大きくして行くと、駆動能力が少々小さくなくても入力電圧が余り変わらないようにできる。すなわち、負荷が軽くなる。

半無限ラダーの抵抗値



無限の性質から、左端に R_1R_2 回路を1段追加しても Z になる。すなわち、

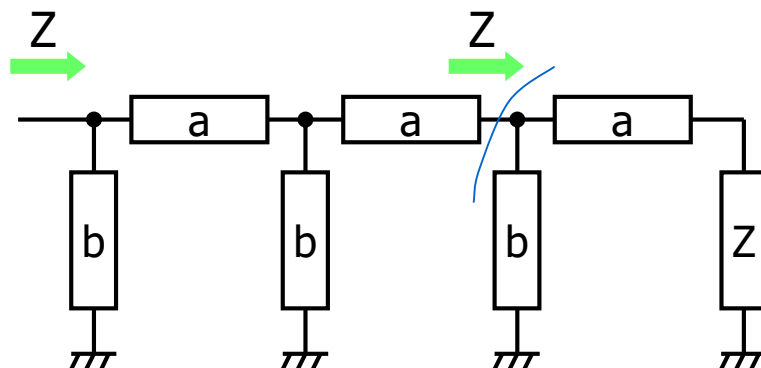
$$Z = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{Z}} \quad \longrightarrow \quad Z^2 - R_1Z - R_1R_2 = 0$$

この2次方程式は正負の実数解を持つが、そのうち正のものが求める値である。

$$\therefore Z = \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + 4R_1R_2}}{2}$$

両側に無限の抵抗列も、同様な発想で扱える。

ラダー抵抗による3dBステップ分圧の実現



無限の連鎖は Z で置き換える
ことで終端できる。

合成抵抗が整合する条件

3dBステップのためには、 $z/(z+a)=1/\sqrt{2}$
が成り立てば良い。

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{z+a} = \frac{1}{z}$$

$$z^2 + az - ab = 0$$

$$z = \frac{\sqrt{a^2 + 4ab} - a}{2}$$

$$\frac{\sqrt{a^2 + 4ab} - a}{\sqrt{a^2 + 4ab} + a} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$b^2 + 8ab - 2a^2 = 0$$

$$b = (4 + 3\sqrt{2})a$$

$$z = (1 + \sqrt{2})a$$

参考文献

- ▶ Cadence, "Verilog-A Language Reference," Product Version 7.1, December 2008.

シミュレータの仕組みは、このマニュアルから学びました。バージョンはドンドン変わっていると思いますが、この目的には入手できたものを用いれば良いでしょう。シミュレータの扱いが、すなわち回路の法則です。

- ▶ 電気学会, "電気回路論(改訂版)," 1970.

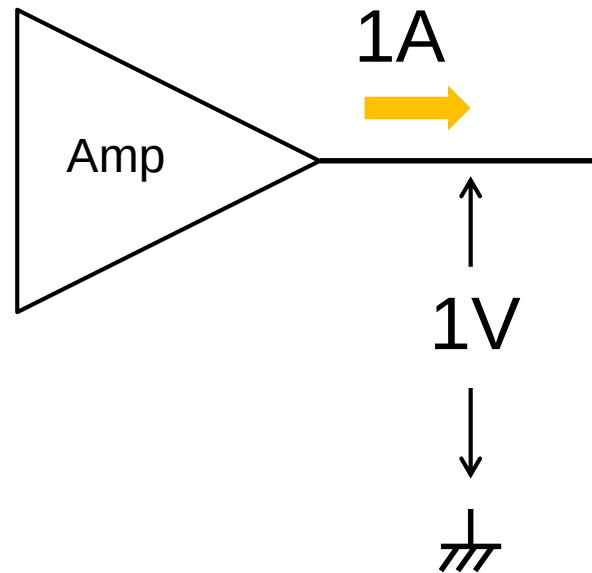
完成度の高い教科書です。何でも載っています。電圧と電流の双対性まで言及しています。もっと入手が簡単な教科書で良書も多いだろうと思います。

- ▶ G.Kirchhoff, "On the Solution of the Equations Obtained from the Investigation of the Linear Distribution of Galvanic Currents," IRE Transactions on Circuit Theory, Vol. 5, No. 1, pp. 4-7, 1958.

キルヒホッフ第2論文のJ.B.O'Tooleによる英訳です。

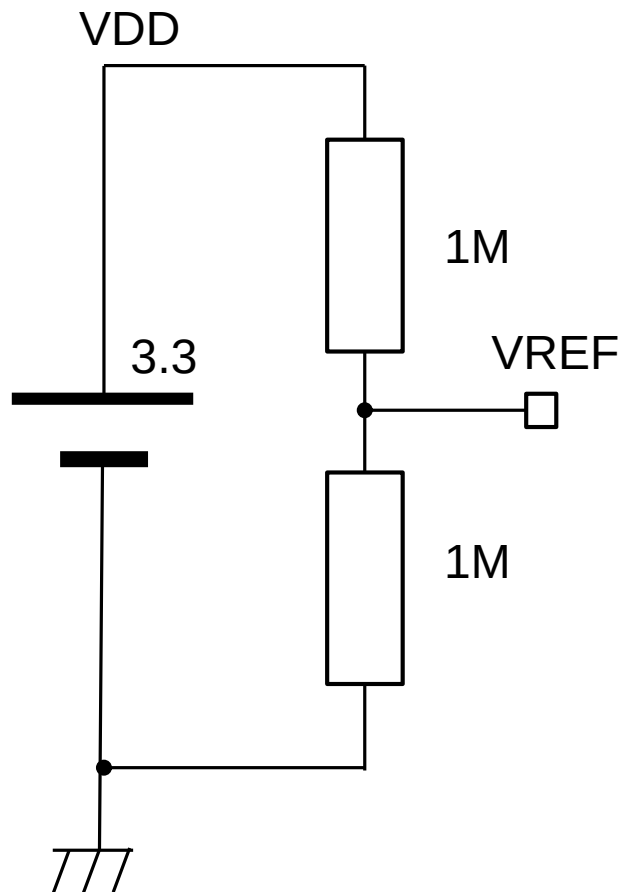
レポート課題2-1 Ampの出力インピーダンスは？

『インピーダンス』は、次回説明しますが、しばしば『抵抗』と同じ意味で用いられます。



レポート提出先: yuji.gendai@gunma-u.ac.jp

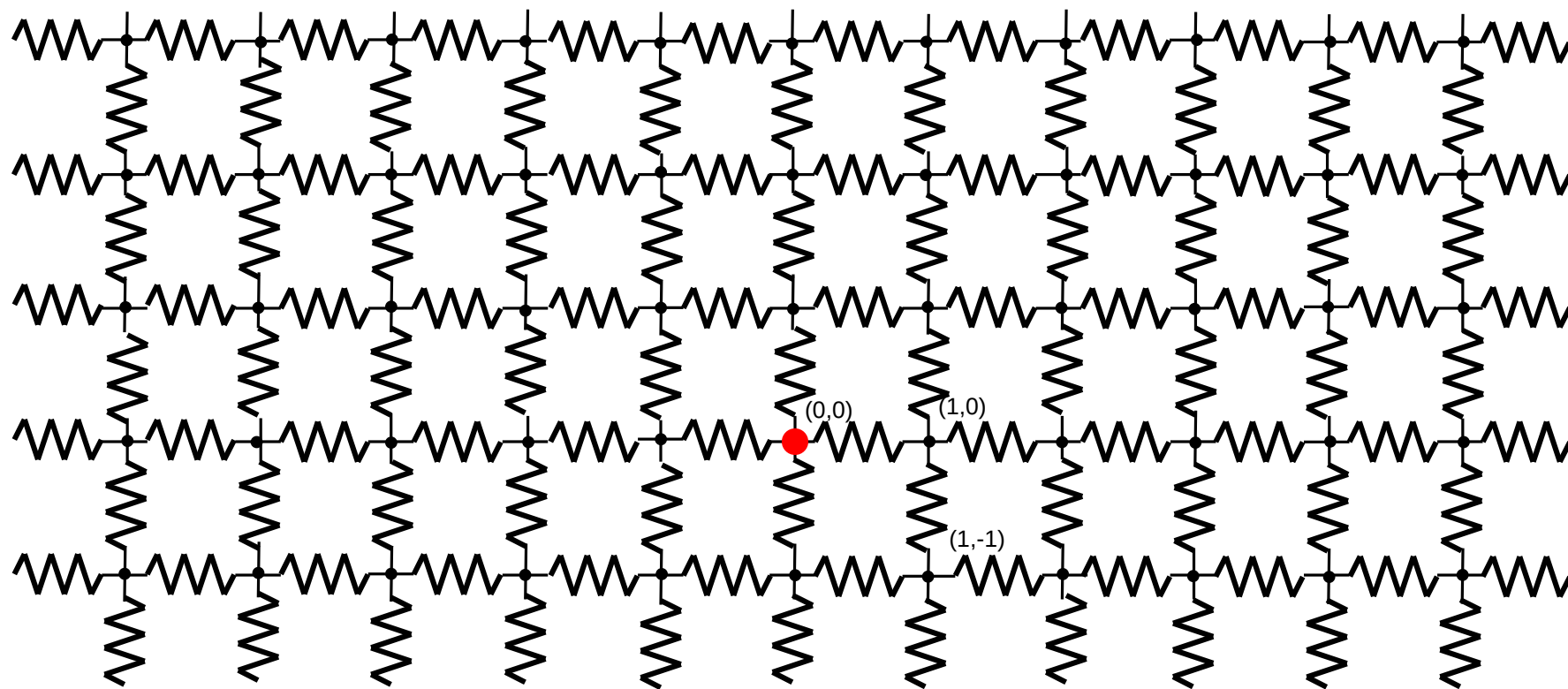
レポート課題2-2 参照電圧回路の謎



左図は $VDD/2$ の参照電圧回路である。
(アイドル電流をケチるために、大きめの抵抗を用いている。)

電圧をざっくり確認しようと、オシロのプローブをVREF端子に当てたところ1.1Vしかなかった。(実験してみよう。)
一体何が起きたのであろうか。

レポート課題 2-3 無限ネットワークの抵抗値



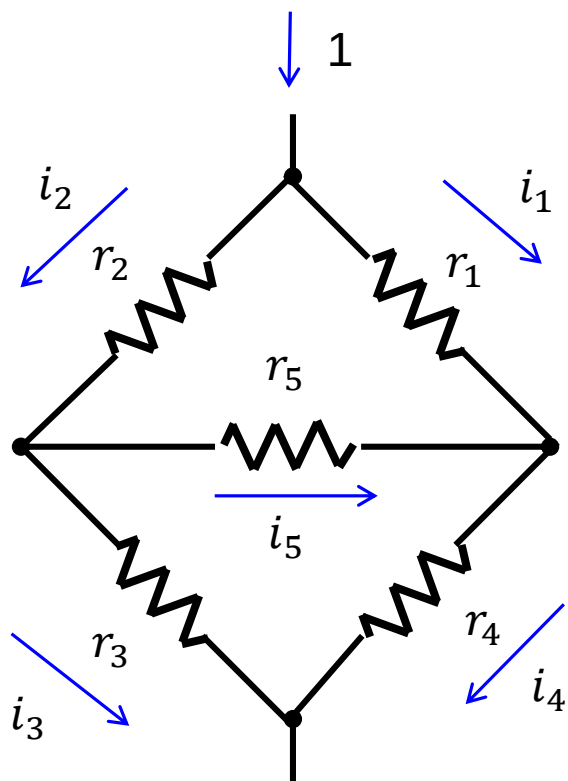
上図のような抵抗の2次元ネットワークが、無限に広がっているとする。各抵抗は全て 1Ω とする。どこかを原点に定めた時、そこから (m, n) だけ離れたノードまでの抵抗値はどうなるか。

出典: Donald R. Mack, "The Unofficial IEEE Brainbuster Game Book," IEEE Press, 1992.

レポート課題 2-4

本日の講義の中で、間違いもしくは、不適切な発言と思うものがあれば、指摘ください。

ブリッジの合成抵抗



左図のブリッジ回路の合成抵抗を3通りの方法で計算しよう。まずは、Kirchhoffの方程式から。KVLから

$$i_1 r_1 = i_2 r_2 + i_5 r_5 \quad (1)$$

$$i_3 r_3 = i_5 r_5 + i_4 r_4 \quad (2)$$

KCLから

$$i_1 + i_5 = i_4 \quad (3)$$

$$i_2 = i_3 + i_5 \quad (4)$$

全電流を1にすると

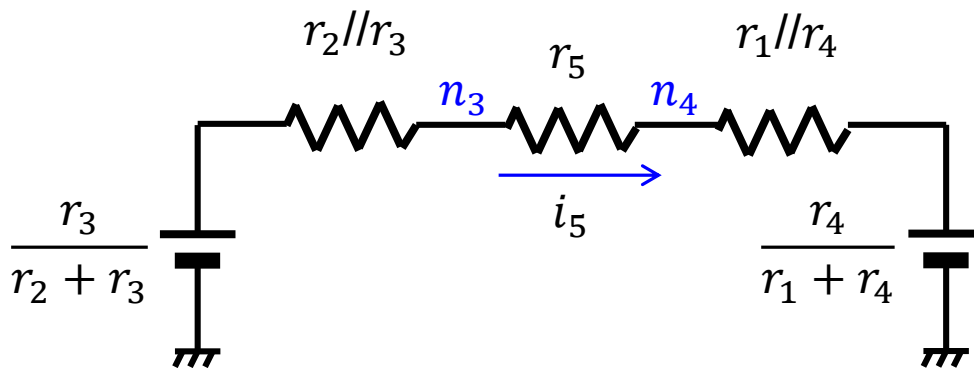
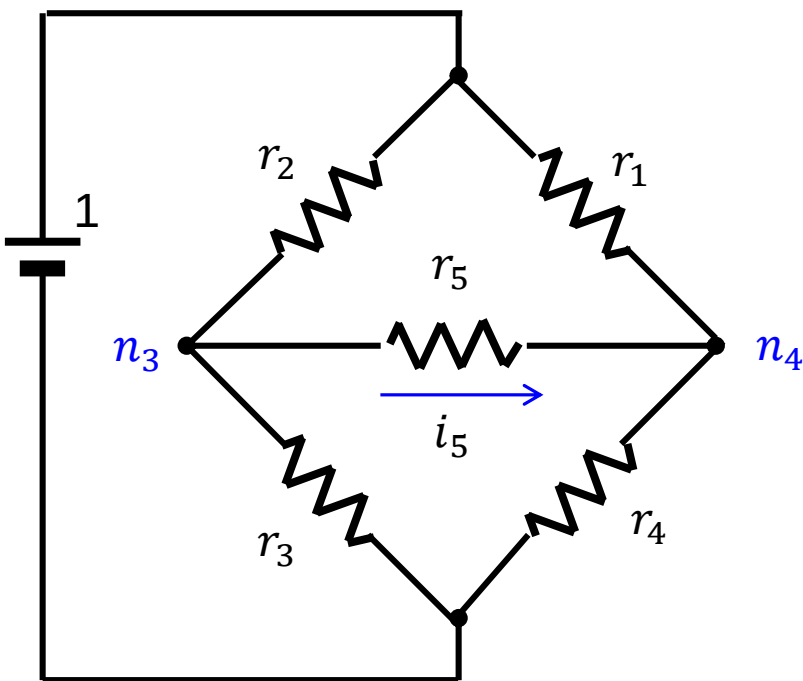
$$i_1 + i_2 = 1 \quad (5)$$

(1)から(5)を連立させると、未知数と方程式数が一致する。抵抗 R は

$$R = i_1 r_1 + i_4 r_4$$

で求まる。後は、連立方程式を解くだけである。

Thevenin equivalenceの使い方



左図のThevenin等価回路を求めると上図のようになる。//は並列抵抗の記号である。左図で直列に繋がれている r_2 と r_3 が、Theveninでは並列に見えている。(この感覚は、回路を感じるためにスコブル重要)

電圧を1にしたので、電池の電圧が無次元になっている。(次元感覚にも屡々助けられる。計算間違いを発見しやすい。) 電圧駆動だと抵抗ではなくコンダクタンスで求まるが、Norton equivalenceでは図が書き難かった。

Ohmの法則を使うと、

$$i_5 = \frac{\frac{r_3}{r_2 + r_3} - \frac{r_4}{r_1 + r_4}}{(r_2 // r_3) + r_5 + r_1 // r_4}$$

あとは、ノード n_3 と n_4 の電圧を求め、 r_2 と r_1 に流れる電流を求めて行けばよい。

SapWin4を用いる方法

The screenshot displays the SapWin 4.0 (0.61) software interface. The main window shows a circuit diagram with a 1A current source and five resistors (R1, R2, R3, R4, R5) connected in a bridge-like configuration. The circuit is powered by a 1A current source. The SPICE netlist in the 'bridgeR.fdt' window is as follows:

```
v1:  
+ ( R3 R4 R5 + R2 R4 R5 + R2 R3 R4 + R1 R3 R5 + R1 R3 R4 + R1 R2 R5 + R1 R2 R4 + R1 R2 R3 )  
+ ( R4 R5 + R3 R5 + R2 R5 + R2 R4 + R2 R3 + R1 R5 + R1 R4 + R1 R3 )
```

The right-hand panel shows simulation settings. The 'End Time' is set to 1.0 s, and the 'Frequency Interval' is set to Start 1 and End 1e9. The 'Y Linear' and 'X Linear' checkboxes are unchecked, and 'Y auto scale' is checked. The 'Min' and 'Max' values are both 0. The 'Refresh' button is highlighted. The 'Components' and 'Parameter' tabs are visible, with the 'Components' tab showing R1, R2, and R3 set to 1.

回路図入力ツールはスコブル使いにくいですが、所望の結果が直ちに得られるので重宝している。