

材料デザイン学 第 6 回

電気的特性 / 電気抵抗率・伝導度

岸田 逸平

Last-modified: 2016/10/12 22:25:14.

目次

1	電気の利用	2
2	電気伝導性による材料の分類	2
3	良導体	3
3.1	用途	3
3.2	電気抵抗	4
3.3	実用材料	5
4	絶縁体	6
4.1	材料	6
5	C 同素体の電気伝導性	7
6	電池材料	7
6.1	電子伝導とイオン伝導	7
6.2	リチウムイオン二次電池	8
6.3	電池の基本的な構成	8
6.4	電解質	8
6.5	電極	10
6.6	出力	10

6.7	高イオン伝導性材料の開発	11
7	まとめ	11
7.1	小レポート	11
7.1.1	前回小レポート講評	11
7.1.2	小レポート	11

電気的特性とは、電気抵抗率（導電率）、誘電率、圧電効果、といった電気の関係する性質を包括的に取り扱った言葉。

1 電気の利用

人間が社会的生活を送るために必要な物資は、「絶え間ない供給が必要か」という観点で大きく2種類に分けることができる。「衣食住」という言葉があるが、衣料や建物は継続的な供給がそれほど重要ではない。しかし水や食料は途絶えることのない継続的な供給が必須である。また、電気・ガスなどのエネルギーも同様に継続的な供給が必要であり、これらを供給するためのインフラ設備はライフラインと呼ばれる。

ガス・石油などのエネルギー媒体ではエネルギーの生産地と消費地の間で物質の輸送が必要だが、送電線を使った電力輸送はエネルギーの移動に物質の移動を伴わない。また、様々なエネルギー形態への変換が容易である。(Fig. 1)

2 電気伝導性による材料の分類

良導体・半導体・絶縁体 という分類がある。これらは元々大まかな分類方法であり、電気を通し易いものを _____、通し難いものを _____、その中間くらいのものを _____ と呼び分けていたものだ。現在では、バンド理論によってより厳密な分類がなされている。

電気抵抗率・電気伝導度 物体の形状が細いほど、また長いほど抵抗が上がるように、電気抵抗は物体の形状に依存する。形状に依存しない物性値として、 _____ がある。抵抗 R 、電気抵抗率 ρ 、長さ L 、断面積 A の関係は以下である。

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

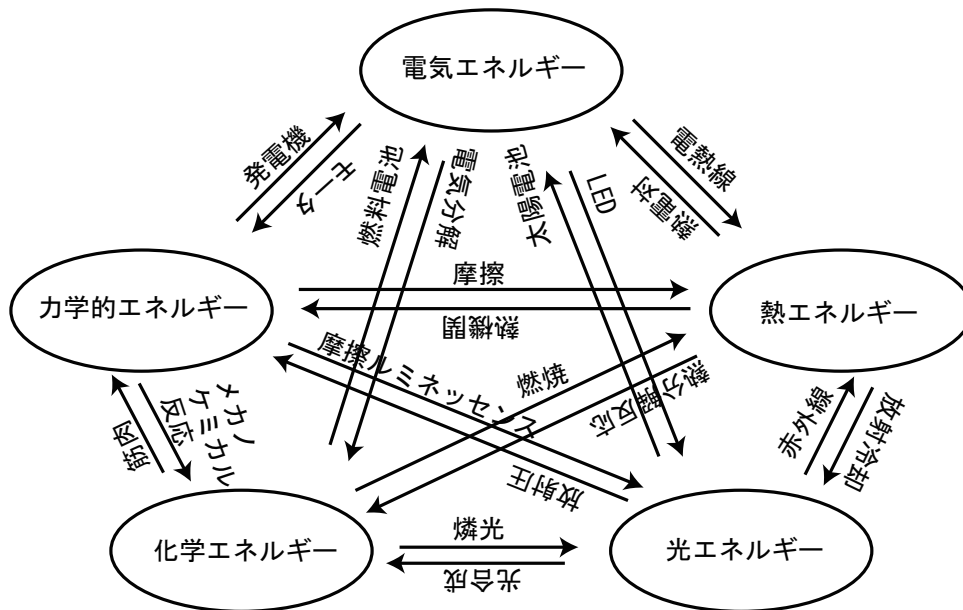


図1 (fig20141119a) 慣用的なエネルギーの分類と変換の例。

電気抵抗率 ρ [Ωm] は電気伝導度 σ [S/m] の逆数である。^{*1}

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2)$$

電気抵抗率は一般的な金属では 10^{-8} [Ωm] 程度、絶縁体では 10^{13} [Ωm] 以上にもなる。電気抵抗率は物質によって非常に幅広い値を取る物性値であり、これほど幅広いレンジを持つものは他にあまりない。^{*2} (Table 1)

3 良導体

固体材料では金属が代表的な良導体であるため、「金属」と言ってしまう文献もある。しかし _____ が良導体であるように、金属以外にも良導体は存在する。

3.1 用途

- _____ : 電力の輸送。

^{*1} 単位 S は ジーメンズと読む。

^{*2} Ag と ポリエチレンの電気抵抗率の比は 10^{24} 。宇宙の直径は 150 億光年 = $1.5 \times 10^{10} \times 3 \times 10^8 [\text{m/s}] \times 86400 [\text{s}] \times 365 [\text{day}] \sim 10^{26} [\text{m}]$ 。 10^{24} の比というのは陸上トラックと宇宙の直径の比くらい。

表 1 (table20131119a) 電気抵抗率 ρ 。

ρ [Ωm]	物質	分類
1.59×10^{-8}	Ag, 銀	良導体
1.68×10^{-8}	Cu, 銅	
2.21×10^{-8}	Au, 金	
2.65×10^{-8}	Al, アルミニウム	
1.00×10^{-7}	Fe, 鉄	
2.08×10^{-7}	Pb, 鉛	
1.64×10^{-5}	C, 炭素, 黒鉛	
6.90×10^{-1}	Ge, ゲルマニウム	半導体
3.97×10^3	Si, ケイ素	
$\sim 10^{13}$	硬質ゴム	絶縁体
$10^{10} \sim 10^{14}$	ガラス	
$\sim 10^{16}$	ポリエチレン	

- _____ : 電話線、LAN ケーブルなど。
- 電気回路の配線。
- 電磁石。

3.2 電気抵抗

電気抵抗による問題:

- _____
- 信号品質の低下。ネットワーク接続などの通信距離や速度に影響 (S/N 比)。
- _____
- コイルの巻き数の限界

良導体に主に期待される特性は少ないロスで電気を伝えることであり、中間的な電気抵抗率が求められることは少ない。良導体においては、一般に抵抗の少ない材料が望まれる。電気抵抗は電子波の散乱に由来し、有限温度の格子振動によるものがその

主たるものである。_____の抵抗率は一つの値として既に測定されている。^{*3}合金化は合金元素が_____として働くため一般的に電気抵抗率が_____する方向に作用する。このことから室温付近で使う材料の電気抵抗率には限界があり、電気抵抗率のみに注目した場合には材料設計の余地はほとんどない。材料に含まれる欠陥を減らすことで抵抗率を下げることは不可能ではないが、良導体の電気伝導は_____^{*4}であり、構造欠陥があっても電気抵抗率の値は大きく変化しない。欠陥に起因する抵抗率の上昇は実用上ほとんど問題にならない。

超伝導材料は良導体の限界を越えた極限と言える。より高温で安定して超伝導を発現する物質の創成は材料設計的な考えも有効だが、超伝導を議論するには量子論に対する深い理解が必要であり、本講義では扱わない。

3.3 実用材料

実用材料としては銅、アルミニウム、金、銀などが使われることが多い。金属でありさえすれば電気伝導度は大きくは異ならず、それが大きな影響を与えることも少ないので、実用上の材料選択としては電気伝導度以外の要因で決められることが多い。^{*5}

Tables 1, 2 で示されているように、通常は_____が最も電気伝導性の良い材料とされることが多い。しかし高価であるため、導電体として使用されることはあまりない。

電気配線には_____が最も広く使われる。銀に比べれば電気抵抗率が若干高いものの、桁違いに安価であるためである。

長距離の電力輸送には鉄塔に架線された高圧電線がよく用いられる。この場合、架線にかかる重量が重要になり、抵抗率が多少高くても密度が低ければ重量あたりの抵抗率は低下しうる。この観点から、銅よりも抵抗率は高いものの密度の低い_____が高圧送電線によく用いられる。なお、長距離ケーブルでも電話やインターネットなどの海底ケーブルは重量に耐える必要性が低いいため銅が主に使われる。

集積回路では細かな配線が必要になることから、展性・延性に富む_____が

^{*3} 温度には依存する。一般に良導体の抵抗率は高温になるほど上昇する。

^{*4} 材料に含まれる欠陥にあまり影響を受けないこと。対義語は構造敏感。

^{*5} 良導体の選択は材料設計というよりは、より単純な「材料選択」と言うべきかもしれない。

使われることがある。^{*6}

電気回路の導電接着には _____ が使われる。これは鉛や錫の合金であり、低融点という特性に主に注目したものである。鉛はやや抵抗率が高いが、導電接着のためにこの低融点という特性が不可欠である。

表 2 (table20131119b) 電気抵抗率と密度、価格。価格は 2013 年 11 月頃のおおよその値。参考: 世界経済のネタ帳 (<http://ecodb.net/pcp/metal/>), 田中貴金属工業ウェブサイト (<http://gold.tanaka.co.jp/commodity/souba/>), 日刊鉄鋼新聞 (<http://www.japanmetaldaily.com/>)。

抵抗率 [Ωm]	物質	密度 [g/cm^3]	価格 [円/kg]
1.59×10^{-8}	Ag	10.50	75000
1.68×10^{-8}	Cu	8.96	700
2.21×10^{-8}	Au	19.32	4300000
2.65×10^{-8}	Al	2.70	180
2.08×10^{-7}	Pb	11.35	200
1.00×10^{-7}	Fe	7.87	70

4 絶縁体

ほとんどの場合、良導体は絶縁体と組み合わせて使われる。良導体と同様、ある程度以上の電気抵抗率であれば実用上の差はほとんどないことから、実用上の材料選択としては電気伝導度以外の要因で決められることが多い。

4.1 材料

- セラミックス
- ガラス
- ゴム・樹脂

^{*6} 携帯電話 1 台に 30 mg ほど使われているらしい。金含有率にすると 150 g/t とのこと。なお、金鉱山の金鉱石は 5 g/t ほどで、それより遥かに高濃度である。製品や廃棄物に集積された元素という意味で、「都市鉱山」という言葉が使われることがある。

ケーブル被覆 柔軟性、耐久性、密度、耐熱性など。

碍子(がいし) 機械的強度、耐候性、耐食性など。

5 C 同素体の電気伝導性

C 原子からなる固体である黒鉛は良導体である。同じく C 原子からなる固体であるダイヤモンドは良導体・絶縁体のいずれに分類されるか？

C は 4 個の価電子を持つ原子である。黒鉛は 6 角形を埋め尽くしたシートが積層した構造になっている。各 C 原子は 3 個の C 原子と共有結合している。共有結合には原子から 1 個の電子が使用されるため、黒鉛では C 原子 1 個あたり 1 個の電子が余っており、これが自由電子として働く。これが黒鉛が良導体である理由である。対してダイヤモンドは C 原子同士が 3 次元的なネットワークを形成し、1 個の C 原子は 4 個の C 原子と共有結合している。全ての価電子が共有結合に消費されて電子の余りがないため、自由電子が生じない。よって電気伝導性が低く、_____に近い。^{*7}

なお、フラーレン C₆₀ は $10^8 \sim 10^{14} [\Omega\text{cm}]$ 程度らしい。カーボンナノチューブは構造によって異なるが、主に半導体的らしい。

導電体としての黒鉛は様々な用途に使われている。パンタグラフの擦り板、リチウムイオン電池の負極など。CFRP は導電性を持つ。

6 電池材料

6.1 電子伝導とイオン伝導

ここまでは大雑把に電気抵抗率あるいは電気伝導度のみに注目してきた。しかし電気伝導という現象は電子の移動のみによって担われているわけではない。たとえば、電池の電解質では _____ は起こらず、_____ のみが電気伝導を担うキャリアとなる。^{*8} 電池材料においては電子伝導と _____ の使い分けが重要である。

^{*7} 正確には半導体に分類される。

^{*8} その他に、半導体においては自由電子の他に正孔も電気伝導を担うキャリアとなる。

6.2 リチウムイオン二次電池

今後、化学的特性の話でも出てくる予定なので、電池について詳しく説明しておく。具体的な材料の組成やイオン種で説明した方が理解の助けになるだろう。よって本節では電池の具体例として、リチウムイオン二次電池を取り上げる。

- _____ (primary battery) : 充電できない。
- _____ (secondary battery) : 充電できる。

リチウムイオン二次電池は携帯電話やノート PC などで利用されているものである。リチウムイオン電池はまた電気自動車への応用についても期待されている。電池の性能を向上させれば、これらはもっと便利にもっと安全に利用できるようになる、というのが研究開発のモチベーションである。諸君らも、もっと電池が長持ちして欲しいとか、より強力な CPU でサクサク処理が進んで欲しいと思うことがあるだろう。これらはより高性能な電池を搭載することで改善しうる性能である。

6.3 電池の基本的な構成

電池を改善することは電池材料を改善することである。電池材料を改善するには、それらが電池の中でどのような働きをしているかについて正確に理解しておく必要がある。リチウムイオン二次電池の基本的な構成を Fig. 2 に示す。

現行のリチウムイオン電池は、正極にコバルト酸リチウム (LiCoO_2)、負極に炭素 (C) を用いている。充電状態では負極にリチウムがあり、電池が放電する時にはこの負極にあるリチウムが電子を一個 _____ してイオンとなって電解質を経由して正極に移動する。放出された電子は外の回路を辿り、正極でイオンを受け取るのに使われる。この時に導線を電子が流れ、すなわちここに電流が流れて、ここで仕事を取り出すという仕組みになっている。

6.4 電解質

高い _____ が必要。固体電解質を使う場合は、ここが出力の律速になることが多い。

_____ があってはいけない。あればショートして自発的

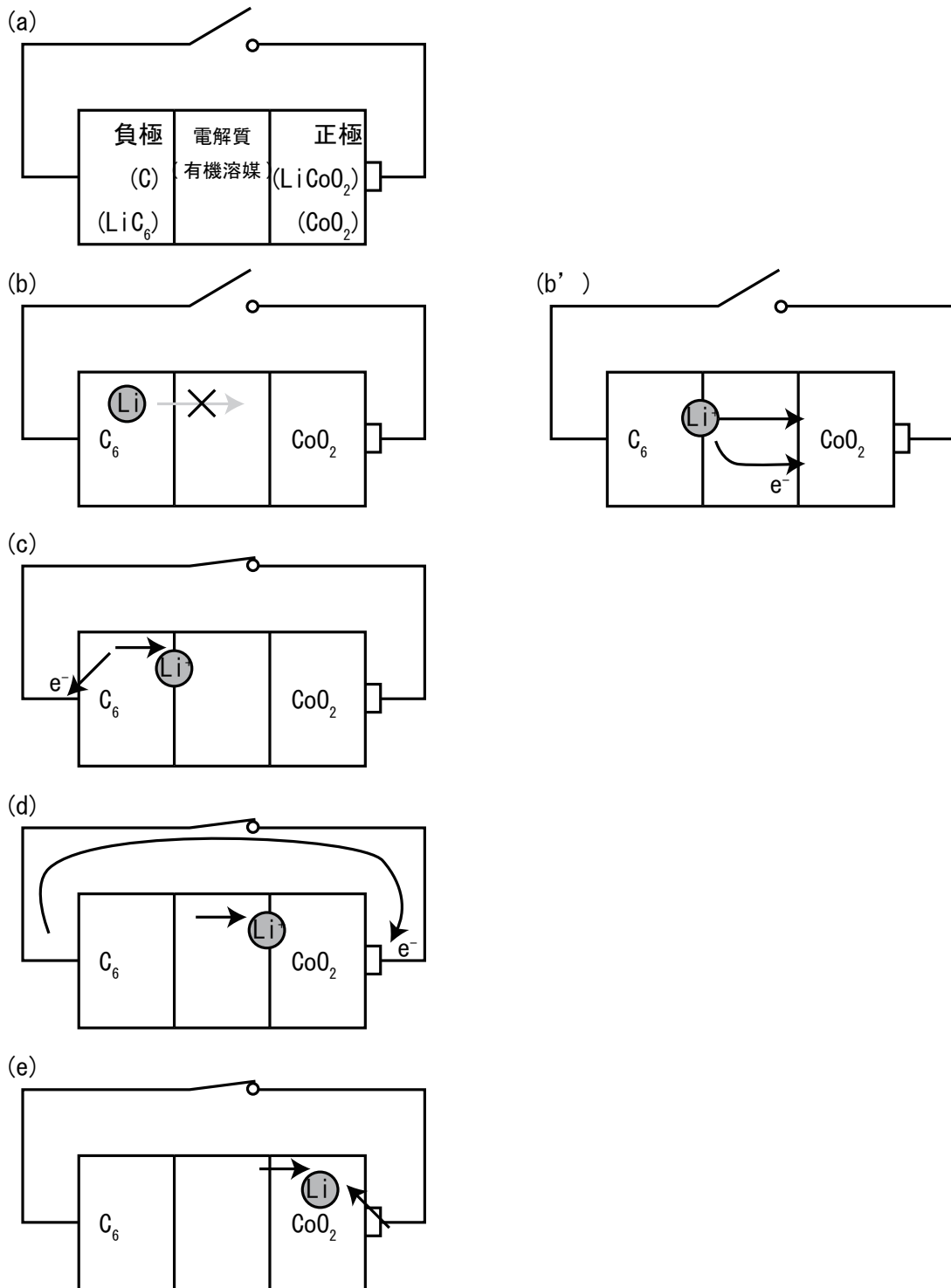


図 2 (fig20131119a) リチウムイオン二次電池の基本的な構成の模式図。(a) 正極・負極・電解質の配置と材料。(b) 充電状態。外部回路が断絶している場合、Li はイオンになれず電解質を通過できない。(c) 回路が繋がり、Li は電子を放出できるようになった結果 Li^+ イオンとなり電解質に溶出。(d) Li^+ イオンが正極に辿り付き、外部回路を通して押し出された電子が正極に到達。(e) 正極内で Li^+ イオンと電子が結び付き、Li 原子になる。(正確には、 LiCoO_2 と電子が結び付く。)(b') 電解質が電子伝導性を持っていた場合、外部回路が閉じなくても反応が進行する。

に反応が進行し、電池は蓄えていたエネルギーを全て放出する。多くの場合、それは発火や爆発といった形を取るだろう。

6.5 電極

電極物質においても、電極-電解質界面の原子だけが反応するのでは十分な電気容量が期待できない。電極内部までイオンが移動するためには、やはり電極材料自体にも高い _____ が必要である。また、ある程度の _____ も必要となってくる。この点が電解質における電気伝導との大きな違いである。

電池に蓄えられるエネルギーや電圧は電極物質で決まることから、電気化学的に定まるポテンシャルが良い値である必要がある。しかしこれは今回の授業の範囲ではない。また次回以降に電気化学的特性について話をする。

6.6 出力

出力とは単位時間に取り出せる仕事のことで、同じ仕事量であっても短い時間に取り出せる方が優秀な電池と言える。出力は、例えば自動車で考えると、強力な加速を生む源になる。(Fig. 3)

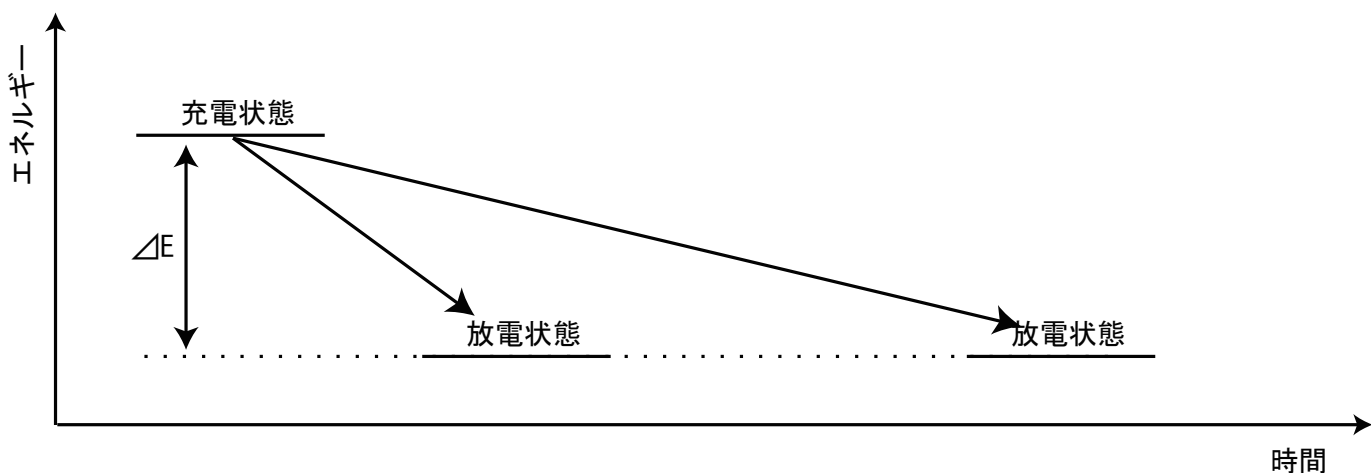


図3 (fig20131119b) 充電状態から放電状態へ移行する際の所要時間と出力の関係。充電状態と放電状態のエネルギー差が ΔE である。このエネルギーを放出する時間が短いほど短時間に大きな力を出すことができ、出力の高い電池と言える。

出力は様々な要因で決まるが、電解質および電極の
が律速となることが多い。^{*9}すなわち、このリチウムの移動が速ければ速いほど単位時間に
取り出せる仕事が大きくなる、逆に言うと、出力を上げるにはリチウムが高速に移動する物
質を電極や電解質に使用すれば良いことになる。^{*10}

6.7 高イオン伝導性材料の開発

高出力な電池を開発する為には高イオン伝導性を持つ材料の開発が必要である。いかにし
て高イオン伝導性物質を設計するかについては次回に述べる。

7 まとめ

- 電気の利用: エネルギー輸送、変換
- 良導体・半導体・絶縁体
- グラファイト、ダイヤモンド
- イオン伝導
- 電池の構成

7.1 小レポート

7.1.1 前回小レポート講評

7×10^{-3} 程度の値となったはず。有効数字は1桁となる。

なお、有効数字を考えずに3桁程度出すと、 6.71×10^{-3} 程度。

7.1.2 小レポート

Table 2 の各材料 (特に Cu と Al) を使って 1m あたりの抵抗が $10^{-4}\Omega$ となる断面積を
求めよ。また、そのときの 1 m あたりの重量と価格を算出せよ。

^{*9} 電気的な測定では内部抵抗として測定される。

^{*10} ここでは単純化して素材レベルの話にしているが、実際には界面反応も重要。

中部電力ウェブサイトによると、裸硬銅より線では 18.2 mm 径、断面積 200 mm² , 1.7kg/m。鋼芯アルミより線では 28.5 mm 径、断面積 410 mm² , 1.7kg/m。逆算的に 1m あたりの抵抗を計算すると、

$$R = \rho \frac{L}{A} = 1.68 \times 10^{-8} \times \frac{1}{200 \times 10^{-6}} = 1.68 \times 10^{-2} \times \frac{1}{200} \quad (3)$$

$$= 0.84 \times 10^{-4} \quad (4)$$

問題文の抵抗はこの値を参考に設定した。

さて、

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (5)$$

$$A = \rho \frac{L}{R} \quad (6)$$

今ここで、1m あたりの抵抗を 10^{-4} にすることを考えているので、

$$\frac{R}{L} = 10^{-4} \quad (7)$$

$$\frac{L}{R} = 10^4 \quad (8)$$

よって、

$$A = \rho \frac{L}{R} \quad (9)$$

$$= \rho \times 10^4 \quad (10)$$

1m あたりの体積を V [m³/m] ,

$$V = AL = \frac{\rho L}{R} L = \frac{\rho L^2}{R} = \rho \frac{L}{R} \quad (11)$$

$$= \rho \times 10^4 \quad (12)$$

密度 r [g/cm³] とすると、密度 r' [kg/m³] は、

$$r' = r \times 10^{-3} / 10^{-6} \quad (13)$$

$$= r \times 10^3 \quad (14)$$

1m あたりの質量を m [kg/m], とすると、

$$m = Vr' = \frac{\rho L}{R} \times r \times 10^3 = \rho r \times \frac{L}{R} \times 10^3 = \rho r \times 10^4 \times 10^3 \quad (15)$$

$$= \rho r \times 10^7 \quad (16)$$

1 kg あたりの価格を c [円/kg]、1 m あたりの価格を p [円/m] とすると、

$$p = mc = \frac{\rho L r}{R} \times 10^3 \times c = \rho r c \frac{L}{R} \times 10^3 = \rho r c \times 10^4 \times 10^3 \quad (17)$$

$$= \rho r c \times 10^7 \quad (18)$$

以上をまとめると、

$$A = \rho \times 10^4 \quad (19)$$

$$m = \rho r \times 10^7 \quad (20)$$

$$p = \rho r c \times 10^7 \quad (21)$$

Cu:

$$A = 1.68 \times 10^{-8} \times 10^4 = 1.68 \times 10^{-4} \quad (22)$$

$$m = 1.68 \times 10^{-8} \times 8.96 \times 10^7 = 1.68 \times 8.96 \times 10^{-1} = 1.50 \quad (23)$$

$$p = 1.68 \times 10^{-8} r c \times 10^7 = 1.68 \times 8.96 \times 700 \times 10^{-1} \quad (24)$$

$$= 1053 \quad (25)$$

のように求まる。

計算結果をまとめたのが Table 3。 (07-report.rb)

表 3 (table20131119c)

element	area[m ²]	mass[kg/m]	price[yen/m]
Ag	1.59×10^{-4}	1.669	125212
Cu	1.68×10^{-4}	1.505	1053
Au	2.21×10^{-4}	4.269	18359796
Al	2.65×10^{-4}	0.715	128
Pb	20.8×10^{-4}	23.608	4721