

5. 温度で変わる電気の通り易さ

金属中を電子が移動して電流が流れる

金属原子の最外殻軌道は電子が充足されていませんから、他の原子に属する電子により軌道を充足されて結合します。2 個の金属原子の結合した分子に隣接する 3 番目の金属原子が接近するとき、2 個の原子を結び付けている電子が 3 番目の金属原子の原子核とも相互作用しますから、新たに結合を形成します。さらに、4 個でも 5 個でも金属原子が集合すれば、電子をそれぞれ出し合って結合を形成しますが、それらの結合に関与する電子はみな共有するように結合性軌道を充足してゆきます。金属原子が集合して 3 次元的に整然と並んだ固体において全ての原子が相互作用して、集合体を構成する全ての原子が互いに結合し、その全ての最外殻の電子を共有して 1 個の分子のようなものを作り上げます。このように金属元素が集合して相互作用するとき、原子が互いに引き付け合う結合を金属結合と呼んでいます。

最外殻に 1 個の電子を持つ n 個の金属原子が集合して相互作用するときには n 個の軌道ができますが、そのうちの半分がエネルギー的に安定な結合性軌道で、そこに充足するように n 個の電子が 2 個ずつ入ります。残りの半分の軌道はエネルギー的に不安定な反結合性軌道で、電子が充足されずに空になっています。3g のリチウム金属の塊では n が 6×10^{23} であるように金属原子が集合した金属では n が極めて大きな値ですから、各軌道はエネルギー的に多少安定性が異なっても各軌道間のエネルギー差は極めて小さくなり、電子は各軌道間を容易に移動できる帯のようになり、バンドと呼んでいます。電子が充足している結合性軌道のバンドを価電子帯、電子が充足されず空になった反結合性軌道のバンドを伝導帯、2 つのバンドの間を禁制帯あるいはバンドギャップと呼んでいます。この価電子帯のバンドを充足している電子は各原子に帰属していませんから極めて流動的で自由電子と呼ばれています。

金属の塊の先端に外部から電子を入れ込みますと、価電子帯には電子が充足していますから伝導帯に入ります。伝導帯は電子が充足されずに空になっていますから、入った電子はその帯の中を自由に動き回ることができ、容易に金属の塊の末端にも電子が移動します。この末端で電子を外部に放出すれば、電子が先端で入り金属の塊の中を通過して末端から出てゆき、結果として金属の塊の中を電流が流れたこととなります。ここで、価電子帯から伝導帯に電子が移動するためには禁制帯を飛び越えなければなりませんから、当然相当するエネルギーを要します。また、伝導帯にしか電子の入れる空席はありませんから、外部から電子を入れ込む時にも同じように相当するエネルギーを要します。伝導帯への電子の移動や入れ込みに要するエネルギーの大きさは禁制帯の大きさに依存します。大きな禁制帯を持つ金属では高い電圧で大きなエネルギーを帯びた電子しか伝導帯に入ることができませんから、電流が流れ難く電導性をほとんど示しません。逆に、小さな禁制帯をしか持たない金属では、わずかな電圧しか示さない小さなエネルギーを帯びた電子でも伝導体に

入ることができますから、電流が流れ易く高い電導性を示します。

太い水道管は大量の水を流すことができ、細い水道管は少ししか水を流すことができません。同じように物質の太さとその流れ易さにより、物質の中を流れる電流の量が変化します。そのため断面積 1cm^2 の物質を 1cm の長さを電流が流れる時に生じる電気抵抗で電導性を表していますので、電化製品に広く用いられている種々の金属や合金の電気抵抗率を表 5-1 に掲げておきます。表から明らかなように金や銀や銅のような貴金属類は最も電

表 5-1 種々の金属や合金の電気抵抗率(ρ)と温度係数(α)

金属	成分	$\rho \times 10^6 (\Omega \text{cm})$	α
銀	Ag	1.63	0.00407
アルミニウム	Al	2.74	0.00435
金	Au	2.31	0.00397
ビスマス	Bi	114	0.00446
コバルト	Co	9.71	0.00658
クロム	Cr	2.6	
銅	Cu	1.73	0.00429
燐青銅	Cu(96%)、Sn(3.7%)、P(0.3%)	4	0.00350
黄銅	Cu(70%)、Zn(30%)	6	0.00170
コンスタンタン	Cu(55%)、Ni(45%)	49	0.00001
鉄	Fe	10	0.00621
鋼	Fe(99%)、C(1%)	20.6	0.00400
けい素鋼	Fe(95.5%)、Si(4.5%)	62.5	0.00075
ステンレス 430	Fe(82%)、Cr(18%)	60	
ステンレス 301	Fe(74%)、Cr(18%)、Ni(8%)	72	
水銀	Hg	94.7	0.00099
マグネシウム	Mg	4.31	0.00390
ニッケル	Ni	11.8	0.00634
ニクロム	Ni(80%)、Cr(20%)	100	0.00002
鉛	Pb	20.7	0.00421
白金	Pt	11	0.00387
アンチモン	Sb	39	0.00473
錫	Sn	11.3	0.00447
タングステン	W	5	0.00464
亜鉛	Zn	5.92	0.00416

気抵抗率が小さく、アルミニウムやマグネシウムなどの軽金属類がこれに続きます。若干非金属性を示す鉛やビスマスなどはかなり電気抵抗が大きくなり、低い電導性を示します。

電気を通す有機化合物

現在までに性質の明らかになっている化合物は約 15000000 種類と推定されていますが、そのうちの 90%以上は構成する原子が共有結合で結ばれている物質です。共有結合にはそれぞれの原子に属する電子のうちの 1 個ずつが相互作用する単結合、2 個ずつが結合に関与する 2 重結合、3 個ずつが関与する 3 重結合の 3 種類があります。単結合では図 2-4 (A) のように結合軸の上で相互作用して σ 結合と呼ばれる結合を形成します。2 重結合では 2 個の電子が結合軸上で相互作用する σ 結合を作っていますが、残りの 2 個の電子は軸上に存在せず直交軸上に存在します。 σ 結合で結ばれた原子間の距離は小さく、直交軸上の電子は図 2-4(B) に示すように側面が重なり合うために相互作用し、 π 結合として 2 重結合を形作ります。

2 つ以上の二重結合が単結合と交互に結合することを共役と呼んでいます。表 5-2 には標準的な単結合化合物のエタンや二重結合化合物のエチレンと比較して、共役した構造を持つ 1,3-ブタジエンの結合距離と最も安定な分子の構造を掲げておきます。この表から明らかなように、1,3-ブタジエンの 2 つの二重結合はエチレンの結合距離に比較して長く、2 つの二重結合を結び付けている単結合はエタンよりも短くなっています。また、2 つの二重結合を単結合が結び付けていながら、1,3-ブタジエンを構成している 10 個の原子は二重結合のようにすべて同一平面上に位置する構造をしています。図 5-1 に示すように 1,3-ブタジエンは 4 個の炭素原子が σ 結合で結ばれ、それらの炭素原子には直交軸上にそれぞれ 1 個ずつの電子が存在しています。これらの炭素原子は σ 結合で結ばれて近接していますから、直交軸上の電子の側面が重なり合い相互作用して 3 つの σ 結合の上に 2 つの π 結合が形作られます。4 個の炭素原子の間に π 結合が拡がり相互作用することにより、1,3-ブタジエンの場合には総結合エネルギーが 5kcal/mol ほど大きくなります。このように π 結合が相互作用することを共鳴といい、その共鳴により増加した結合エネルギーを共鳴エネルギーと呼んでいます。

表 5-2 共役化合物の分子構造の特徴と共鳴エネルギー

	炭素-炭素結合距離	構造	共鳴エネルギー
エタン	1.54 Å	正 4 面体構造	0 kcal/mol
エチレン	1.34 Å	平面 120°	0 kcal/mol
1,3-ブタジエン	1.35 Å、1.46 Å	平面 E 型構造	5 kcal/mol
ベンゼン	1.39 Å	平面正 6 角形構造	36 kcal/mol

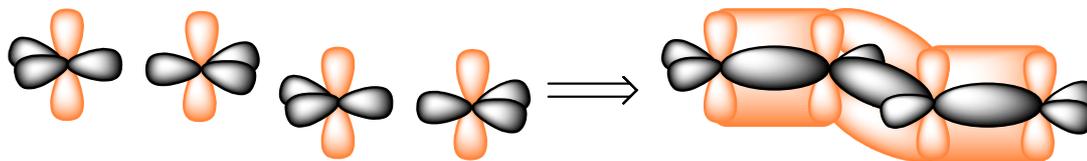


図5-1 4個のsp²型炭素から共役2重結合

1,3-ブタジエンでは共役した π 結合の直交軸上の π 電子は4個の炭素原子上に広がっていますが、多くの二重結合が共役した構造を持つ分子においても同じように直交軸上の π 電子は構成するすべての炭素原子上に広がっています。白川博士は図5-2のようにアセチレンを重合させて非常に多くの二重結合と単結合が交互に結合した共役ポリアセチレンの合成に成功し、2000年にノーベル化学賞を受賞していますが、この物質においても直交軸上の π 電子は構成するすべての炭素原子上に広がっています。炭素原子の直交軸上の π 電子が他の炭素原子に属する π 電子と相互作用して、結合性軌道と反結合性軌道の2個の軌道を生じ、結合性軌道が2個の π 電子で充足されます。1,3-ブタジエンでは直交軸上の近接する4個の電子が相互作用して、空の2個の反結合性軌道とともに π 電子で充足された2個の結合性軌道を生じます。炭素原子の直交軸上のn個の π 電子が共役して相互作用するときにはn個の π 結合の軌道ができますが、そのうちの半分がエネルギー的に安定な結合性軌道で、そこに充足するようにn個の電子が2個ずつ入ります。残りの半分の軌道はエネルギー的に不安定な反結合性軌道で、電子が充足されずに空になっています。

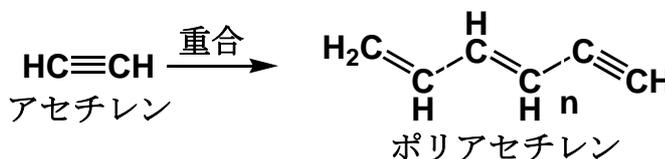


図5-2 アセチレンの重合

ポリアセチレンのように多くの二重結合が共役してnが極めて大きな値のときには、各軌道はエネルギー的に多少安定性が異なっても各軌道間のエネルギー差は極めて小さくなり、金属の塊の場合と同じように電子は各軌道間を容易に移動できる帯のようになります。電子が充足している結合性軌道は価電子帯、電子が充足されず空になった反結合性軌道は伝導帯のようになります。充足している電子は各原子に帰属していませんから極めて流動的で自由電子のように挙動します。共有結合で結ばれた物質は一般的にあまり電導性を示しませんが、ポリアセチレンのように長く共役した多くの二重結合を持つ物質は有機電導体と呼ばれて金属に近い電導性を示します。

分子式がC₆H₆のベンゼンは19世紀に性質が明らかになった極めて安定な化合物ですが、炭素原子の原子価が4価であることを考えると多くの二重結合や三重結合を分子の中に入れていることとなります。Kekuléは3本の二重結合と単結合が交互に6角形に結ばれ共役した構造を考えました。その後、3本の π 結合が強く共鳴しその共鳴エネルギーが36

kcal/mol と見積もられ、ベンゼンの分子構造が図 5-3 のように平面正 6 角形をしていることも明らかになりました。このことから正 6 角形の 6 本の σ 結合の上に 3 本の π 結合は拡がり、直交軸上の π 電子は自由に移動できると思われます。分子式が $C_{10}H_8$ のナフタレンではベンゼン環が密着して連続し、直交軸上の 10 個の π 電子も環上に拡がり自由に移動できる構造をしています。

黒鉛のすべての炭素原子は亀甲模様に正 6 角形が無限に繋がった平面構造をしており、

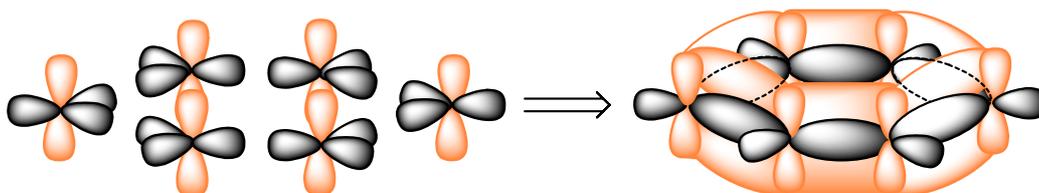


図5-3 6個の sp^2 型炭素からなるベンゼン環

直交軸上の π 電子も構成するすべての炭素原子上に拡がって共鳴しています。当然、炭素原子の直交軸上の n 個の π 電子には n 個の π 結合の軌道ができますが、そのうちの半分がエネルギー的に安定な結合性軌道で、そこに充足するように n 個の電子が 2 個ずつ入ります。残りの半分の軌道はエネルギー的に不安定な反結合性軌道で、電子が充足されずに空になっています。黒鉛はベンゼン環が無限に繋がっており、無限に大きな数の π 電子が共鳴していますから、電子が充足している結合性軌道は価電子帯、電子が充足されず空になった反結合性軌道は伝導帯のようになり、充足している π 電子は各原子に帰属していませんから極めて流動的で自由電子のように挙動します。そのために黒鉛はポリアセチレンのように有機電導体として金属に近い電導性を示します。ベンゼンが大きな共鳴エネルギーを持っているために化学的な反応性に乏しく安定な物質ですが、黒鉛も同じように極めて安定な物質ですから、酸や塩基の中などの過激な反応条件の下でも変化しません。そのために二酸化マンガンを用いる汎用のマンガン乾電池の陽極材のように、電池や電気分解などの電極として広く用いられています。

ブドウ糖が長く鎖状に繋がったセルロースを酸素のない条件で高温に加熱しますと、揮発性の水などが熱分解により取り除かれて骨格の炭素原子だけが残り木炭になります。Edison が白熱電球の研究において、発光部分となるフィラメントに種々の物質を試しましたが、竹の繊維を高温で炭化した炭を最終的に用いて白熱電球を完成させました。このとき竹の繊維を構成しているセルロースは分子の骨格を形作っている炭素原子だけが残り炭化します。この竹の炭は化学的に安定なベンゼン環の繋がった物質であるために、電導性を示しフィラメントとして適していました。

アクリルアミドやアクリロニトリルを重合したポリアクリルアミドやポリアクリロニトリルは代表的なプラスチックとして大量に製造されていますが、これらのプラスチックを繊維状に変形した後に酸素のない条件で高温に加熱しますと、図 5-4 に示すよう

に水やアンモニアなどの揮発性成分が取り除かれて炭化します。繊維状のポリアクリルアミドやポリアクリロニトリルは炭素原子が共有結合により長く繋がっていますから、竹の炭と同じようにこの炭素の骨格が黒鉛のようにベンゼン環が長く繋がった物質に炭化します。しかも繊維の形状を保ったままで炭化しますから、炭素繊維と呼ばれるベンゼン環の繋がった繊維が作られます。炭素繊維は軽くて大きな引っ張り強さを持っていますが、脆くて壊れ易いため柔軟性の高いプラスチックで固められてテニスラケットやゴルフクラブなどに利用されています。この炭素繊維はベンゼン環が黒鉛のように長く繋がった構造をしていますから、有機電導体としての性質の利用も期待されています。

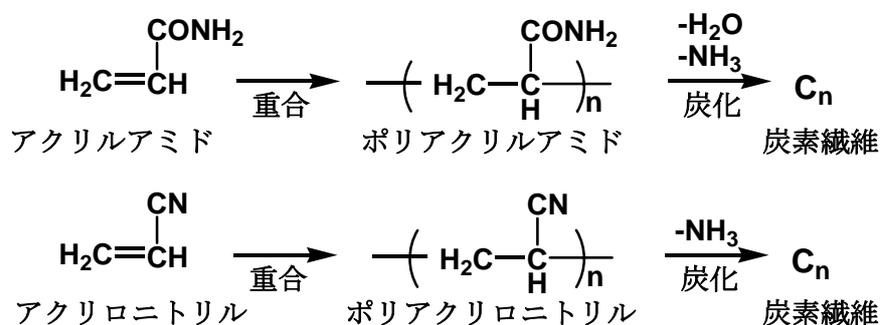


図5-4 炭素繊維生成反応

金属中の電子の動き難さで測る体温

金属結合した金属の塊では整然と並んだ金属原子の間に最外殻電子が相互作用して、価電子帯に電子が充足し、伝導帯は電子が空の状態になっています。整然と並んだ金属原子を広く覆っている伝導帯の端に電子を入れ込めば、この空の伝導帯の中を電子は電流となって自由に移動してゆきます。水が水道管を流れてゆく時に、途中が曲がりくねったり邪魔なものが詰まっていたりする場合には流れが乱されて流れ難くなります。金属原子に隙間ができていたり、多少並び方が乱れていたりすれば、同じように電子も自由な移動が乱されるために電流が流れ難くなります。

純粋な金属では同じ大きさの金属原子がその金属結合の強くなるように密着して集合していますから、原子と原子が隙間なく整然と並んでいます。しかし、2種以上の金属原子が混ざりながら集合した合金においては、それぞれの原子の大きさが異なりますから、密着して整然と並ぶことができません。当然、原子間に隙間が生じ伝導帯を移動する電子の移動も乱されてしまいますから電導度が若干低下します。例えば、クロムは電導性の非常に良い金属ですから、クロムを含む合金のステンレス 430 では電気抵抗がクロムの含有量に比例して減少すると思われませんが、主成分の鉄の6倍も電気抵抗が増加してしまいます。表5-1に掲げた例の中でも、銅を主成分とする合金や鉄を主成分とする合金において、主成分の割合が低くなるほどに電気抵抗の大きくなる傾向が見られます。

第3章で考えたように、物質は固体と液体と気体の3種の状態に変化しますが、そこには構成している原子や分子の間に働いている分子間力とそれらの構成粒子がもつ運動エネルギーの均衡の仕方が影響します。分子間力は金属結合やクーロン力や水素結合や van der Waals 力などの力を総合したもので、構成する粒子の間の距離に反比例します。これに対して運動エネルギーは粒子の質量とその運動の速度に関する関数であり、運動の速度は温度が上昇するほど大きくなります。金属の状態は原子間に働く金属結合と金属原子の持つ運動エネルギーの均衡の仕方です。低い温度では、金属原子の運動エネルギーが小さく、原子間の距離が小さく整然と原子が並びますから固体の状態になり、高い電導性を示します。温度が若干上昇すると、金属原子の持つ運動エネルギーも若干大きくなり、原子間距離が大きくなりますから金属結合も若干弱まります。固体状態では金属原子間に顕著な隙間ができるわけではありませんが、電子の自由な移動が若干阻害され電気抵抗が増大し電導性が低下してきます。このような温度による金属の電気抵抗の変化は式 5-1 に示すような1次関数で近似することができ、 $t^{\circ}\text{C}$ における電気抵抗率 ρ_t は 0°C における電気抵抗率 ρ_0 と温度係数 α から算出することができます。ここで温度係数 α は 0°C と 100°C における電気抵抗率をそれぞれ ρ_0 と ρ_{100} とするとき、式 5-2 で定義され表 5-1 に併せて掲げておきます。

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) \quad \text{式 5-1}$$

$$\alpha = \frac{\rho_{100} - \rho_0}{100 \cdot \rho_0} \quad \text{式 5-2}$$

式 5-1 が1次関数ですから、低温になれば電気抵抗率は小さくなり高温になれば大きくなります。当然一定の電圧を加えておけばその金属に流れる電流量は温度が低いほど大きくなりますから、電流量で温度を測定することができます。白金は容易に精製でき、化学変化を受け難いために経年変化が小さく再現性に優れていますが、その上に $-200 \sim 650^{\circ}\text{C}$ の広い温度範囲で温度と電気抵抗の間に式 5-1 の比例関係がありますから広く測温抵抗体に用いられています。とくに、JPT100 Ω は 0°C で 100Ω の抵抗を持つ白金測温抵抗体として JIS 規格が決められています。17世紀に発明された温度計は18世紀に入ると水銀を用いるようになりましたが、温度計の破損により拡散する水銀の毒性が近年になって問題になって来ました。そこで、日常生活に密着した体温計なども測温抵抗体が用いられるようになってきました。また、温度変化が電流の変化として測定できますから、信頼性の高い温度検知器(温度センサー)として空調設備や冷蔵庫やオーブンレンジなど多くの電化製品の中に組み込まれています。

さらに、種々の物質の量を測定するガスクロマトグラフィーの TCD 検知器にもこの測温抵抗体が用いられてきました。熱した物に冷たい風が当れば物は冷やされますが、そのとき比熱の大きな気体が当たれば強く冷やされ、比熱の小さな気体ではあまり冷やされま

せん。ガスクロマトグラフィーは気体の混合物から構成する気体をそれぞれ分離する装置ですが、電流を流して熱したタングステン線をこの分離した気体の流れの中に晒しますと、表 5-3 に掲げたように気体は種類により定圧比熱が異なりますからタングステン線の冷やされ方も異なります。温度変化をしたタングステン線は電気抵抗の温度係数が 0.00464 ですから、当然、電流量の変化を引き起こします。この電流量の変化から分離された気体の量を定量します。この TCD 検出器を装備したガスクロマトグラフィーにより、東京都庁前など国内各地で大気を汚染している一酸化窒素や二酸化硫黄やベンゼンなどの公害物質も二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスも連続して測定されています。

表 5-3 種々の気体の定圧比熱 (cal/deg·g·mol)

物質名	分子式	定圧比熱	物質名	分子式	定圧比熱
ヘリウム	He	4.97	塩素	Cl ₂	8.45
アルゴン	Ar	4.97	アンモニア	NH ₃	8.58
酸素	O ₂	6.23	メタン	CH ₄	8.77
一酸化窒素	NO	6.36	二酸化炭素	CO ₂	8.96
窒素	N ₂	6.80	二酸化硫黄	SO ₂	9.27
水素	H ₂	6.86	二硫化炭素	CS ₂	10.90
塩化水素	HCl	6.95	エタノール	C ₂ H ₅ OH	17.59
一酸化炭素	CO	6.96	ベンゼン	C ₆ H ₆	19.53
硫化水素	H ₂ S	8.27	四塩化炭素	CCl ₄	19.93
水蒸気	H ₂ O	8.38	ヘキサン	C ₆ H ₁₄	35.13

温度が変化したり異質の金属が混合したりすることにより、金属原子の間に隙間ができたり、多少並び方が乱れていたりすれば、電子の自由な移動が乱れますから電流が流れ難くなり電気抵抗が変化します。体温計や電化製品の温度センサーやガスクロマトグラフィーの検知器など多くの物にこの現象が利用されています。

火のないところに煙を立てる電気

Joule は 1847 年に電流が流れると物質が発熱することを見出しましたので、そのとき発生する熱を Joule 熱と呼んでいます。電流と電圧と電気抵抗の関係を表すオームの法則を考え合わせますと、Joule 熱 Q は物質の両端に負荷する電圧を V 、その物質の電気抵抗を R 、物質を流れる電流量を I 、電流を流す時間を t とするとき、式 5-3 のような関係式で表すことができます。また、金属などの物質固体中の電気抵抗 R は式 5-4 のように電気抵抗率 ρ と物質の長さ l に比例し、断面積 a に反比例します。エネルギーの保存則は物理学の基本となる原則ですが、ここで Joule 熱となって熱エネルギーが発生するときには電流の

持つ電気エネルギーが減少しますので、式 5-3 は電気エネルギーの熱エネルギーへの変換の関係を表しています。

$$Q = VIt = RI^2t = \frac{V^2}{R}t \quad \text{式 5-3}$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{a} \quad \text{式 5-4}$$

通常の電線に使われている銅も電流を流せば Joule 熱を発生しますが、表 5-1 に掲げたように電気抵抗率 ρ の値が小さいので、非常に細い線か非常に長い線の場合を除いて、大きな電流を流さなければあまり発熱しません。しかし、大電力を発電する発電所は電気的大量消費地からは遠く離れた所にありますから、大きな電流量を送電しなければなりません。例えば、大電力を発電している茨城県の鹿島火力発電所から東京都心まで直線距離で約 90km 離れていますが、この間の銅線の電気抵抗は太さが 1cm^2 であれば 17.3Ω となり、 100cm^2 であれば 0.173Ω となります。もし、毎時 $4 \times 10^9\text{W}$ の電力を $4 \times 10^5\text{V}$ の高電圧で送電しますと太さが 1cm^2 の電線ではすべて Joule 熱に変化してしまい東京都心まで約 60%しか送電できませんが、太さが 100cm^2 であれば 99%以上の電力が送電でき電力の損失が 0.4%に止まる計算になります。現在の送電は空中に架けられた銅製の電線を通して行われており、Joule 熱による発熱量に比べて容易に放熱しますから、電線の温度上昇による抵抗の変化がなく銅線が送電用に適しています。しかし、銅の比重は 8.93g/cm^3 ですから太さが 100cm^2 の銅線 1m の重さは約 90kg となり、平均して 300m の間隔で建てられている鉄塔に架けられた銅線の重さは 1本の電線で 27t になり、通常 3本 1組で送電されますから電線の重さは 81t になります。地震や強風などの自然災害への対応を考え合わせますと、このように重い電線を支えるためには非常に堅牢な鉄塔が必要になります。また、電圧を高くすれば電流量は小さくなりますから大電力を送電しても Joule 熱として損失する電力は小さくなりますが、強い磁場の発生に伴い周囲に電波障害をもたらす、湿度や塩害による大地への放電や漏電などの電力の損失が大きくなります。長距離を送電する場合にはこれらの種々の要素に加えて、電線の素材となる銅の価格や発電に要する燃料の価格などの経済性も絡み合って現在の送電技術が用いられていますが、経済環境の変化や技術の進歩によりさらに送電技術も変化して行くことでしょう。

電導性を持つ金属や合金に大量の電流を急激に流しますと、放熱量よりも大量の Joule 熱が発生しますから、温度が上昇して電気抵抗が増大します。温度の上昇が金属や合金の融点を超えると液化して断線してしまい、電流の流れを遮断します。電気抵抗率とその温度計数を表 5-1 に掲げておきましたし、第 3 章で取り上げたように鉛と錫を主体とする融点の低い合金に大量の電流が流れますと、瞬時に融けて断線してしまいますからヒューズとして用いられています。多くの電化製品の電源に近い部分にこのヒューズの電線を直列に接続しておきますと、不慮の故障などにより定額以上の電流が電化製品に流れた時には、発

生ずる Joule 熱により断線し易いヒューズの特性が働いて電流を遮断しますから、電化製品の安全装置の役割を果たします。

放熱を抑えながら電流を流して Joule 熱を利用する場合には、銅線は発熱により温度が上昇しますと ρ の値が大きくなりますから、急激に発熱量が増大して銅の金属が融けて断線してしまいます。そのために銅は電流を流すことにより発熱させる素材としては不相当と考えられます。同じようにタングステン線も電気抵抗率 ρ が小さく、温度係数は大きな値を持っていますが、タングステンが 3300°C 以上の非常に高い融点を持っていますから、急激に発熱量が増大しても融けることがなく明るく輝きます。この急激に発熱して高温になり明るく輝く性質は白熱電球のフィラメントに適しているために広く照明器具に用いられています。これに対して、ニッケルとクロムの合金のニクロムは大きな電気抵抗を持っていますから、比較的太いニクロム線でも電流を Joule 熱として熱エネルギーに変換することができます。その上ニクロム線の電気抵抗の温度係数は非常に小さく高温においてもほとんど電気抵抗の値が変化しませんから流れる電流量にも変化がなく、温度により発熱量が変化しません。そのためにニクロム線は高い温度まで安定した発熱を可能にします。このような電気抵抗の特性から、ニクロム線は調理器具や暖房器具や乾燥器具など種々の高温を必要とする電化製品の熱源に用いられています。

第 4 章にまとめたように、けい素鋼を磁性材料としてコイルを巻きつけますと、コイルに電流を流して発生する磁場の影響を蓄える強力な電磁石を製作できます。けい素鋼は保磁力が小さいために、コイルに流す電流量に即応するように磁石の強さが変化しますから、この電磁石に発生する磁場の変化により引き起こされる電磁誘導の現象により、電磁石に巻きつけた別のコイル(2次コイル)に電流が流れます。この電磁石のコイルに交流電流を通電すれば、磁場の方向と強さは交流電流と同じ周期で逆転しながら変化し電磁誘導しますから、2次コイルに同じ周期の電流が発生する変圧器を作ることができます。この電磁石のコイルに交流電流を通電して発生する同じ周期で逆転しながら変化する磁場に、鍋などの金属製の器を近づければ、電磁誘導の現象により同じ周期で器の金属中を電流が流れます。器の素材が鉄やステンレスの場合には大きな電気抵抗を持っていますから、この電磁誘導による電流は Joule 熱を発生します。このように電磁誘導により発生する Joule 熱を利用して加熱する方法を IH ヒーターと呼び、近年家庭用の調理器具として利用されるようになりました。IH ヒーターは原理的に適当な電気抵抗を持つ電導性の良い器でのみ発熱し、銅製やアルミニウム製の器では電導性が良過ぎるために熱効率が悪くなります。また、プラスチックやガラスの器や陶磁器では全く加熱することができません。

Joule の見出した電気エネルギーから熱エネルギーへの変換の現象は多くの電化製品の中に利用されてきました。暖房器具や調理器具や乾燥器具などにおいて高温に加熱する目的で Joule 熱が利用されていますが、白熱電球やヒューズなど生活を快適にまた安全性を高める目的でもこの現象が利用されています。さらに近年では IH ヒーターのように間接的な電磁誘導による新しい加熱方法まで開発されていますが、送電時のエネルギーの損失など

無視できない負の影響もあり、技術改良が求められています。

電気が永久に流れ続ける超電導

前の節で考えたように、金属の状態は原子間に働く金属結合と金属原子の持つ運動エネルギーの拮抗の仕方です。低い温度では、金属原子の運動エネルギーが小さく、原子間の距離が小さく整然と原子が並びますから固体の状態になり、高い電導性を示します。温度が若干上昇しますと金属原子の持つ運動エネルギーも若干大きくなり、原子間距離が大きくなりますから金属結合も若干弱まります。固体状態では金属原子間に顕著な隙間があるわけではありませんが電子の自由な移動が若干阻害され、電気抵抗が増大し電導性が低下してきます。このような温度による金属の電気抵抗の変化は式 5-1 に示すような 1 次関数で近似することができます。電導性の良い銅とアルミニウムのそれぞれの温度計数 0.00429 と 0.00435 をこの関係式に代入しますと、約 -230°C で ρ の値が 0 になり、全く電気抵抗を示さないと計算されます。この関係式があくまで近似式であり、極限に近い低温における状態を表しているわけでは有りませんが、非常に低い温度においては金属原子の運動はほとんど停止してしまい、電子が自由に移動できる状態になると思われれます。実際、 -271.08°C (1.18K) まで冷却しますとアルミニウムは電気抵抗の全くない状態になることが観察されています。

極めて低い温度で電気抵抗がほとんど 0 になる不思議な状態を求めて多くの研究がなされ、水銀を -269°C (絶対温度、4.2K) まで冷却すると $10^{-5}\Omega$ 以下まで電気抵抗が小さくなることを見出され、超電導状態と名付けられました。この状態では電子は金属の中を全く阻害されることなく自由に動き回ることができますから、一度、電流が流れ始めると Joule 熱の発生などによる電気エネルギーの消耗がないままに永久に流れ続けます。また、磁石の上に超電導体を置きますと、外部磁場を打ち消すように金属結合している電子は自由に動き回ります。磁場を取り除いても電流は永久に流れ続け、反磁性の性質も永久磁石のように持続します。この現象は Meissner により発見されましたので Meissner 効果と呼び超電導状態を判定する目安になっています。この目安を基にした超電導の性質を示す多くの物質が見出されており、表 5-4 にはその物質の元素組成と超電導性を示す臨界温度と Meissner 効果による磁石の強さ (臨界磁場) を掲げて起きます。

磁性材料に電線をコイル状に巻けば電磁石となりますが、磁石の強さはコイルの巻き数とコイルに流れる電流量に比例します。コイルの巻き数に比例して電線の長さは増加しますから、電線の電気抵抗が増加してしまいます。結果として、大きな Joule 熱を発生してしまうために、大量の電流を流すことができず強い電磁石を作ることは困難でした。しかし、超電導状態の電線を磁性材料に巻けば、Joule 熱を発生することなく大量の電流を永久に流し続けることができますから、非常に強力な電磁石を作り出すことができます。第 4 章では、核磁気共鳴吸収現象を利用して炭素を中心元素とする物質の結合の状態が明らかにできるばかりでなく、人間の身体の中まで全く傷つけることなく観察できることを述べてま

表 5-4 代表的な超電導物質の臨界温度(°C)と臨海磁場(テスラ)

構成元素	臨界温度	臨界磁場	構成元素	臨界温度	臨界磁場
Pb	-266		Nb ₁₉ O	-266	
Nb	-265		NbN	-256	47
Sn	-269		ZrN	-262	
V	-268		Mo ₆ PbS ₈	-258	50
Zr	-273		Sr ₂ La ₂ CuO ₄	-236	76
TiNb	-263	13	Ba ₂ YCu ₃ O ₇	-178	170
Nb ₃ Sn	-255	26	Sr ₂ CaCu ₂ Bi ₂ O ₈	-188	400
Nb ₃ Al	-254	33	Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ Bi ₂ O ₁₀	-163	200
Nb ₃ Ge	-249	37	Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ Tl ₂ O ₁₀	-148	200
V ₃ Ga	-256	25	Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ TlO ₉	-151	200
ZrV ₂	-262	24	Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ HgO ₈	-138	
SrBi ₃	-268		BaPbO ₃	-260	50
Nb ₆ SnAs	-255		BaBiO ₃	-243	
BiNb ₆ Sn	-255		Rb ₂ CsC ₆₀	-240	49

した。この核磁気共鳴吸収現象の精度と感度は磁場の強さに比例して向上しますから、超電導状態の電線を利用した電磁石が利用可能になり、核磁気共鳴を利用する技術が格段に進歩しました。特に、人間の身体の中を観察するMRIはこのような電磁石の開発で飛躍的に進歩改良され普及しました。

超電導状態の電線を利用することにより非常に強力な電磁石を作ることができますから、電車のような大きな重量を持つ物体も磁石の反発力で浮き上がらせることができ、磁石の引力と反発力を巧みに利用することによりその物体を地表に接触することなく移動させることができます。この機構を利用したリニアモーターカーが夢の超特急列車として現在山梨県内で実現に向けて研究されています。

このように、Joule 熱を発生しない不思議な状態は計算機や核融合炉など多くの分野での利用法が検討されていますが、未解決の問題も多々存在しています。温度が若干上昇しますと原子の持つ運動エネルギーも若干大きくなり原子間距離が大きくなりますから、電子の自由な移動が若干阻害され、電気抵抗が増大し電導性が低下してきます。表 5-4 から分かるようにいずれの超電導物質もきわめて低い温度領域でのみその性質を示しています。現在、核磁気共鳴装置やリニアモーターカーに利用されている超電導電磁石は沸点が -268.94°C (2.49K) の液体ヘリウムで冷却していますが、ヘリウムは大気中には全く存在せず、北米の地中からわずかに採取できるのみで極めて貴重で高価な物質です。このため、

超電導の性質を利用するためには、現在では非常に高い運転経費を要します。

これに対して、沸点が -195.8°C の液体窒素は空気を冷却すれば容易に得られる冷媒ですから、この温度以上で超電導の性質を示す物質が実用化されれば、飛躍的に容易に高い経済性を持って超電導の性質を利用した技術が普及する物と思われます。さらに、冷却することなく室温付近の温度領域で超電導の性質を示す物質の発見のために多くの研究がなされています。