

# 金属が電気を通すわけ

## — 小中学校理科指導の視点 —

### Electrical conduction of the metal

— in a viewpoint on science education of elementary and junior high school —

福永明日香<sup>a)</sup>, 岩田陽助<sup>b)</sup>, 古屋康則<sup>a)</sup>, 住浜水季<sup>a)</sup>, 土田慎治<sup>c)</sup>, 仲澤和馬<sup>a)</sup>  
Asuka Fukunaga<sup>a)</sup>, Yousuke Iwata<sup>b)</sup>, Yasunori Koya<sup>a)</sup>, Mizuki Sumihama<sup>a)</sup>,  
Shinji Tsuchida<sup>c)</sup> and Kazuma Nakazawa<sup>a)</sup>

a) 岐阜大学教育学部, 理科教育講座 〒501-1193 岐阜市柳戸1-1  
b) 岐阜大学教育学部附属小学校 〒500-8482 岐阜市加納大手町74  
c) 岐阜大学教育学部附属中学校 〒500-8482 岐阜市加納大手町74

#### 要 旨

金属が電気を通すことは誰でも知っているが, その理由を「きちんと」認識している学生・教員は多くない。金属原子に束縛された電子は, 原子が集まる(金属という物体になる)ことによりその束縛が弱く(緩く)なり, 自由電子となる。この束縛の強弱は, 電気抵抗の大小となつてあらわれ, 金属の温度変化に関係する。最後に, 金属なのに電気を通さないアルミの窓枠やジュースの空き缶という「製品」について言及した。

#### 1. はじめに

大学生初年次の理科の学生に, 「電流とは何ですか」と質問すると, 中学生レベルの回答が返ってくる。

すなわち,

高いところから低いところに水が流れるように, 電子が流れることを電流という,  
のだそうだ。それでは,

交流というのは, 電子が行きつ戻りつするので「流れていない」ことになるのでは?  
と尋ねると, 沈黙が訪れる。

次に,

オームの法則に見られる抵抗とは何ですか,  
と質問すると,

流れの中に打った「杭」のようなものであり, 原子がその杭に対応し, 流れる電子が原子に衝突し動きが妨げられる, これが抵抗です。原子が激しく振動することにより, 杭が電子の移動を大きく邪魔することになり, 抵抗が大きくなります,

との回答がくる。そこで,

超伝導という現象を知っていますね。絶対温度で0度近くなると現れる現象ですが, このとき抵抗は0「ゼロ」になるそうです。いくら原子の運動が止まったとしても, そこには厳然と原子があるのに, どうして抵抗が0になるのですか?

と尋ねると, またしても沈黙が訪れる。

理科の学習において, 複雑なもの, 現実に手にとって見えないもの, 光学顕微鏡ですら見えないものを, ある程度「模式化」することの大切さは, 言うまでもない。しかし, 「模式化」と「現実」との混同がしばしば見られ, 上述の「電流」と「抵抗」の2点に関する学生の説明は, その典型であろうと考えられる。

これを, きちんと理解していない授業者が授業を進めると, 「模式化」した描像にいろいろな条件

\*) TEL:058-293-2246 (e-mail:nakazawa@gifu-u.ac.jp)

をつけて、その場をしのごうとする傾向が現れ、非常に見苦しい「言い訳」を並べ立て、そのたびに現実に起こる現象との矛盾に叩きのめされることになる。「これは『本当』のことではないけれども、こう考えると理解しやすくなるでしょう」という見地をなぜとれないのか、不思議に思ってきた。しかし、そうしない理由は明白である。単に、「本当」のことを知らないだけである。

そこで本稿では、金属が電気を通すわけを、教科書には載っていないが高校生でも理解できるはずの論法で述べてみたい。これは、理系の学生や教員のみならず、理科を専門としなかった小学校教員や、理系でない教育学部学生にとっても、有益なものとなるであろうと考える。

一方、小学校の授業で児童に電気を通す物質を探させると、電気を通さない金属製品に出会うことがある。そこで最後に、金属なのに電気を通さない金属製品についていくつか紹介し、その原因について述べたい。

## 2. 「金属」はどのようにできているのか

小学校第3学年における電気の学習では、電気を通すものと通さないものの存在として、金属が取り扱われる。その特徴は、①みがくと光る、②たたくとよく伸びる、および③電気や熱を通す、とまとめられている<sup>[1]</sup>。その金属は、いったい何からできているのだろうか。

学習指導要領解説<sup>[2]</sup>では、物質に対する「粒子」的な見方は「科学の基本的な見方や概念」の「柱」として位置付けられている。例えば、第3学年の「風やゴムの働き」の単元では、「空気の分子の物体への衝突と捉える」、また第4学年の「金属、水、空気と温度」の単元における「温度と体積の変化」の項では、「各物質を構成する原子や分子の運動の激しさと関連付けて、体積変化を捉える」、という見方を授業者自身が持てるかどうか、非常に重要である。これこそ、人間の目に入る「マクロ」な現象と、それを引き起こしている「ミクロ」な世界とを結びつけ、「粒子」的な見方の基礎になるからである。この世のあらゆるものは、原子でできているのである。

そこで、金属はどのような原子でできているのか考えてみよう。中学校理科の教科書<sup>[3]</sup>にも掲載されている元素の周期表には、実に多くの「金属」元素がある。原子量が大きくなるにつれて、非金属元素が少なくなっている。これら金属が電気を通す所以は、「自由電子」の存在にあることは、よく知られた事実である。問題は、この自由電子が何故に存在し得るかである。それは、原子単体では自由に移動できない原子中の電子が、非常に多くの原子の集まりである「物体」の状態になると、自由に移動できるようになるという理由を理解すればよい。

ここでは、原子のモデルを使って説明しよう。その際、単体の原子についてまず解説し、次いで原子の集合体である「金属」について解説する（なお、原子番号3で原子量7のリチウム<sup>[4]</sup>Liを例にとり、原子の構造および自由電子の動きについて、“付録”においてより具体的に解説するので参照されたい）。

### 2-1. 単体の原子中の電子

原子は、その約1万分の1の大きさの原子核を中心に擁し、原子核は原子番号に相当する数の正の電気を帯びた「陽子」と、[原子量-原子番号]個の「中性子」からなっている。あたかも太陽を太陽系の中心として惑星が公転するように、この原子核を中心として負の電気を帯びた電子が円運動している。このようなことは、厳密には「うそ」であるが、1913年にN.Bohrによって提唱されたこのモデルでは、水素原子から発せられるX線のエネルギーがうまく説明されることになった。

このモデルをナトリウムの場合についてエネルギーの尺度で表すと、図1のようになる。縦軸が原子内の電子の位置エネルギーであり、これが正になった場合には、空間を自由に移動できる。横軸は、原子の中心から電子までの距離である。通常この距離は、100億分の1m（1Å[オングストローム]）程度である。原子内の電子は、ある決まった位置エネルギーしか持てない。このことは、破線（「境

界」と呼ぶことにする)で示すように地下深く穴を掘っていき、ある深さのところ部屋を作るのと似ている。部屋(「殻」という)の広さは深くなるにつれて狭くなる。最も深いところのできる部屋をK殻、上に行くにしたがってL殻、M殻、…などと名付ける。それぞれの殻に最大何個の電子が入り得るかなどについては、本稿付録を参照されるか、高等学校物理や化学を復習されたい。ナトリウム原子の場合の図1では、「地表」に最も近いM殻に11番目の電子が入っている。原子中の電子は、境界を突き破って横にはみ出すことができず、原子内部に束縛される。電子には、外部から何らかのエネルギーの供給を受けないかぎり、より「地表」に近い階(殻)へ移行したり、外部に出るなどの術はない。

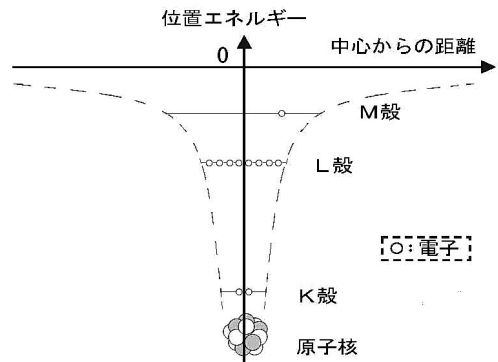


図1. 原子核(ナトリウムを例とした)を取り巻く電子(図中○印)が取り得る位置エネルギーは決まっている。あたかも、地下に掘った部屋のようなのである。破線は部屋の境(境界と呼ぶ)を表す。最深の部屋からK殻などと名付ける。

## 2-2. 原子集合体としての金属中の電子

さて、図1に示したような原子をいくつも集めた集合体において、エネルギーの尺度で電子を表すとどのようになるであろうか。ここでは簡略化のために、まず原子2個の場合を考えよう。図1で示した原子をある距離(「原子間距離」という)だけ離して並べると、図2のようになる。このとき着目すべきは、2つの原子の中間部の破線を重ねた実線である。エネルギーは相加的な量であるため、2つの原子の境界が重なると、双方の和としてさらに深い「新たな境界」ができる。すると、原子1個のときのM殻の電子2個(各原子あたり1個)は、2つの原子の間を自由に移動できるようになる。これが自由電子誕生の所以である。

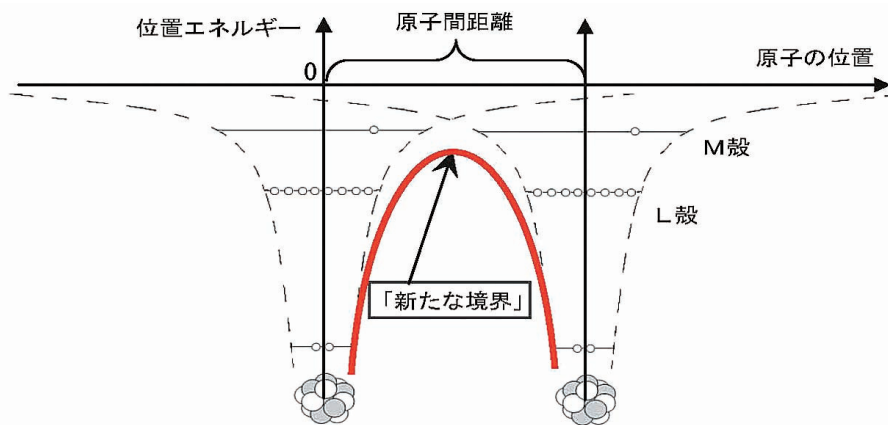


図2. ある距離だけ離して二つの原子を並べた。中央部では破線の境界が重なり合って、実線で示すような、より深い「新たな境界」ができる。このときM殻の電子は、二つの原子の間を自由に移動できるようになる。

この機構による自由電子生成においては、原子間距離が大きく影響する。もし間隔をより広くとると、境界を重ね合わせた「新たな境界」が上方にできるので、M殻の電子は移動できなくなる。

原子をより多く集めて金属になった場合でも、隣り合う原子の境界が重なることによって、より低い(電子に対する束縛の弱い)「新たな境界」が作られ、最も外側を周回する電子(最外殻電子という)が金属内を移動しやすくなる。このようにして発生する金属内に自由に移動できる電子の存在こそが、金属が電気を通す(導電性を示す)原因である。さらに、原子の振動などによる原子間距離の

変化がなければ, 図2における電子は, 境界に邪魔されることなく, つまり抵抗なく(抵抗値0)金属中を移動できる(「超伝導」といわれる)。このような状態は, 絶対温度で0度に近くなると実現される。

### 3. 温度と抵抗の大きさとの関係

電気ヒーターなどに見られるように, 金属に電流を流すと熱くなる。これは「ジュール熱」として電流が「使われる」ためであり, 中学校で学習する「オームの法則」などによれば, 電力 $VI$ は

$$VI = RI^2 = V^2/R \dots\dots\dots (1)$$

と表される。ここで,  $V, I$  および  $R$  は, それぞれ金属にかかる電圧[V:ボルト], 流れる電流[A:アンペア], およびそのときの抵抗[Ω:オーム]である。電流を流して熱くなると, 金属の抵抗 $R$ は温度上昇に比例して大きくなることが知られている。例えば家庭用コンセント(交流100V)や乾電池(1個1.5V)に金属をつないだときに, (1)式において電圧 $V$ が変化しない場合には, 分母の $R$ の増大により消費電力は小さくなっていく。懐中電灯や白熱電球で, 時間とともに暗くなる, といったことが目に見えて起こらないのは, 高温になった後に空気との接触で温度が上がらなくなる(平衡状態になる)からである。

中学校での教育実習・研究授業で, 「オームの法則」, すなわち  $V = RI$  にみられる電圧と電流の比例関係を調べる教習生の研究授業での出来事である。6つの班のうち1つの班だけが, 「電流計の指針が安定せず, それが原因で抵抗がうまくもとめられなかった」, と報告した。教習生いわく, 「そういう誤差もあるね」。教室に唯一の扇風機が, その班のすぐ上で首を振っていた。扇風機の風が当たったり当たらなかったりして, 測定に用いた回路の温度が一定にならなかったのである。

さて本節の目的は, 温度上昇とともに金属の抵抗が大きくなる理由について理解することにある。物質を構成する原子は, 絶対0度にならない限り, ある中心的な位置を基準に振動している(「格子振動」と言われることがある)。金属においてもしかりである(この振動のエネルギーが, まさに物体の持つ熱エネルギーである)。

このような振動を前節2-2に適用すると, 「新たな境界」はどのようにできるのであろうか。図3に示すように, 原子の振動により原子どうしの間隔が広いところと狭いところができ, 図中の「妨害」と示すところのように, 重ね合わせた「新たな境界」がM殻の電子の移動を妨げるような場所が出現する。金属の温度を上げる, つまり熱エネルギーを加える, すなわち原子の振動を激しくすると, 電子の移動を妨げる「新たな境界」がいたるところに出現することになる。したがって, 温度上昇とともに抵抗が大きくなるのである。

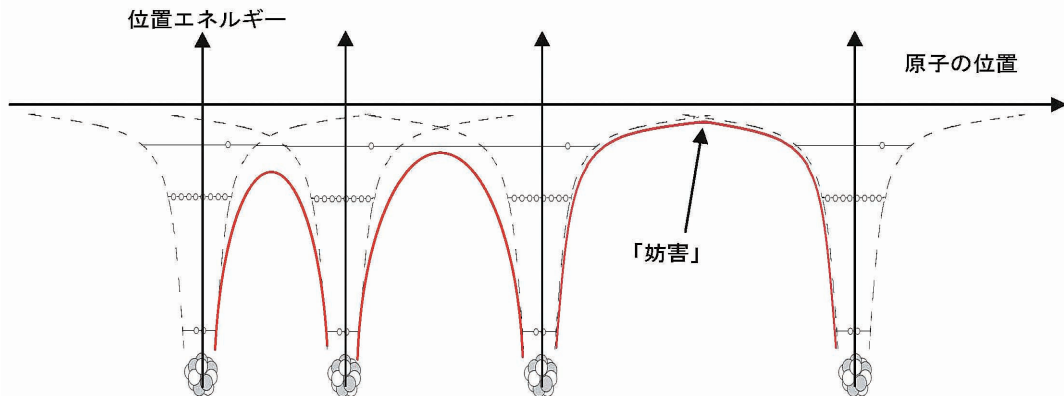


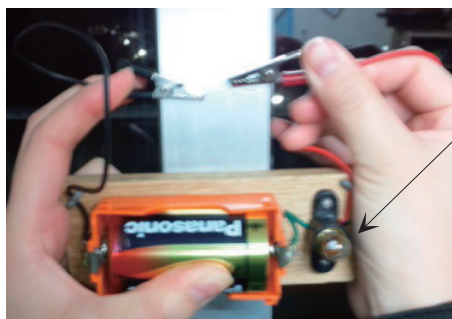
図3. 前述図1の原子を4個並べた上で, 原子の(熱)振動を考慮し, 原子間距離を大きく, また小さくした。右側の間隔が広いところでは, M殻電子の移動は「新たな境界」によって妨害されることになる。

#### 4. 電気を通さない(?) 種々の金属「製品」

前節までに、金属が電気を通す理由や抵抗の生じる原因を述べてきたが、金属「製品」の中には電気を通さないものがある。小学校第3年次における「電気を通す物」の項では、児童に様々なものの導電性を調べさせる。その中で、金属なのに電気を「通さないもの」にいくつか出会ってしまう。授業者自身にとって「予想外」の結果を児童がもたらしたときに、「慌てない」ために解説しておくことは、無駄ではないだろうと考え、アルミの窓枠とジュースの空き缶について述べておく。

##### 4-1. 窓枠 (アルミサッシ)

窓枠などのアルミ製品は、水滴などによる錆びを防止するため、表面が絶縁性の酸化アルミニウム ( $Al_2O_3$ ) で覆われていることがある (酸化皮膜)。一般的には、非常に硬質の皮膜であり、容易には除去できないが、ヤスリなどを用いると皮膜を剥ぐことができる。皮膜除去前および除去後の導電性の結果を、それぞれ図4および図5に示す。除去前には、テスターで測定した抵抗値が無量大を示し、かつ電球も点灯しなかったが、除去後には電球も点灯し、アルミサッシの抵抗も  $0 \Omega$  となった。



電球

図4. アルミの窓枠は、電気を通さず、電球は点灯しない。



電球

図5. アルミの窓枠の表面をヤスリで削ると、電気を通し電球が点灯する。

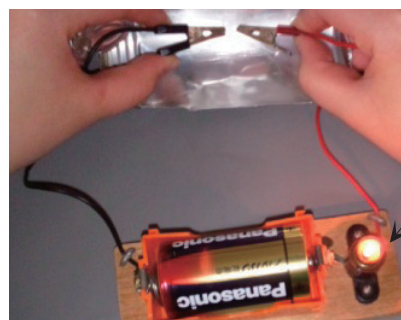
##### 4-2. 空き缶

缶ジュースの空き缶は、これこそ金属であると児童が誇らしげに提示しそうでである。しかし、缶の外側にはいろいろなプリントがなされており、電気を通さない。そこで、缶を金バサミで切り裂き、プリントのない内側を覗いてみると、光沢のある金属そのものである。電気を通すかどうか調べると、図6に見られるように全く電気を通さない。人間が口に入れるものに、金属を直接接触させないために、皮膜で覆われているからである。どのような皮膜であるかを飲料メーカーに問い合わせたところ、各社特有の技術であり、企業秘密の壁を打ち破ることはできなかった。いずれにしても、この皮膜をヤスリで削り落とすと、図7に見られるように、電気を通し、電球が点灯した。



電球

図6. 缶の内側は、電気を通さず、電球は点灯しない。



電球

図7. 缶の内側をヤスリでよく磨くと、電気を通し電球が点灯する。

5. まとめ

小中学校の理科指導の点で、電気に関わる知識の一部—電流と抵抗—についての見方・考え方をまとめた。金属が電気を通すのは、原子集合体としての金属体になることで、電子にとってお互いの境界が低くなるような「新たな境界」が作られることが原因である。これにより、原子単体では動き得ない電子が、金属内を自由に移動できる自由電子となりえるのである。また、絶対零度に近くない金属では原子が振動しており、この振動により「新たな境界」が上下し、電子の移動の自由を妨げることになり、これが抵抗の発生原因であることを示した。また、アルミの窓枠など、通常の試験では、電気を通さないことの原因について述べた。

= 付録 =

A 1. Bohr の原子モデル

原子は、図8に見られるように、中心の原子核と、その周りを回る電子で構成されると考える。

ある決まった位置エネルギーしかとれない原子内の電子は、内側からK殻, L殻, M 殻…というように名付けられる電子殻に位置する。それぞれの殻に入り得る電子の最大の個数を表1 に示す。電子の電気量を  $-e[C]$  とすると、 $Z$  個の陽子を持つ原子核は  $+Ze[C]$  の電気量をもつ（これを、原子番号  $Z$  の原子という）。

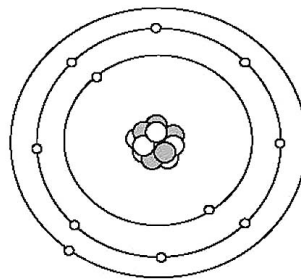


図8. Bohrの原子モデル

表1. 各殻に入る最大の電子数

殻	電子数
K	2
L	8
M	18
N	32
O	50

以下、このモデルに沿って定量的議論を行うが、本節では高等学校の物理の教科書<sup>[4]</sup>に準拠しよう。原子内の電子は、中心にある原子核から電気力を受け、その力を向心力とする等速円運動を行い、この力に起因する位置エネルギーをエネルギー準位という。この定常状態における電子の円軌道は、電子の質量を  $m [kg]$ , 速さを  $v [m/s]$ , 軌道の半径を  $r [m]$  およびプランク定数を  $h [J \cdot s]$  とすると、

$$mvr = nh/2\pi \dots\dots\dots (2)$$

なる関係を満たす、と考える。電子は、角運動量（上式左辺）が  $h/2\pi$  の整数倍になるような状態しか取り得ないことを要請するのである。「そうすれば、原子の性質がうまく説明できる」からである。

そこで、中心に  $+Ze$  の電気を持つ原子番号  $Z$  の図9のような原子について考える。原子核に近いほうの円軌道から、 $n = 1, 2, 3$  と番号をつける。 $n$  番目の軌道を回る電子の速さ、半径およびクーロン力の比例係数をそれぞれ  $v_n, r_n$  および  $k_o$  とおき、電子に働く静電引力および遠心力を、それぞれ  $F$  および  $f$  とおくと、

$$F = -k_oZe \cdot e/r_n^2 \dots\dots\dots (3),$$

$$f = mv_n^2/r_n \dots\dots\dots (4)$$

であり、回転を続ける条件は  $F+f=0$  である。したがって、

$$k_oZe^2/r_n^2 = mv_n^2/r_n \dots\dots\dots (5),$$

となる。(2) 式による、

$$v_n = nh/2\pi mr_n \dots\dots\dots (6),$$

を(5)式に適用すると、

$$r_n = n^2h^2/(2\pi)^2mk_oZe^2 \dots\dots\dots (7)$$

が得られる。

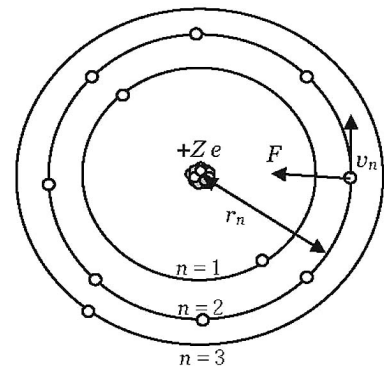


図9. 原子モデルの軌道等の説明。

このようにある決まった軌道に電子が存在する状態を定常状態といい、そのときの電子の持つ力学的エネルギーをエネルギー準位という（本文中では、単に「位置エネルギー」述べている）。 $n$  番目の軌道の電子の持つエネルギー準位  $E_n$  は、電子の運動エネルギー  $T_n (= 1/2 \cdot mv_n^2)$  および静電気力による電子の位置エネルギー  $U_n (= -k_oZe \cdot e/r_n)$  との和である。(5) 式および (7) 式より、位置エネルギー  $E_n$  は、

$$\begin{aligned} E_n &= T_n + U_n = 1/2 \cdot mv_n^2 - k_oZe^2/r_n \\ &= -1/2 \cdot k_oZe^2/r_n \\ &= -1/2 \cdot mk_o^2Z^2e^4(2\pi)^2/h^2 \cdot 1/n^2 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \dots\dots (8), \end{aligned}$$

となり、 $-1/2 \cdot mk_o^2e^4(2\pi)^2/h^2$  を計算すると  $-13.6$  [eV] となるので、最終的に

$$E_n = -13.6Z^2/n^2 \quad \dots\dots\dots(9),$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} k_o &= 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \\ m &= 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg} \\ e &= 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \\ h &= 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

なる数値を用いた。

水素原子 ( $Z=1$ ) においては、最も内側の K 殻 ( $n=1$ ) に入る電子のエネルギー準位は  $E_1 = -13.6$  eV で与えられ、より高い準位 ( $n>1$ ) も含めて、実験値と非常によく一致する。

## A 2. 水素より大きい原子に適用するSlater則

前節で求めた (9) 式を、原子番号 3 原子量 7 のリチウム [ ${}^7_3\text{Li}$ ] に適用すると、エネルギー準位は表 2 のようになる。

表 2. 前節 (9) 式で求めたエネルギー準位と実験値<sup>[5]</sup>。

エネルギー準位 [eV]	
(9) 式の計算結果	実験値
$E_1 = -122$	$E_1 = -58$
$E_2 = -31$	$E_2 = -5.39$

計算値と実験値との相違は明らかである。外側の軌道に位置する電子にとっては、より内側の軌道の電子が原子核の正の電荷を遮蔽してしまい、引力が弱くなるためにこのような相違が起こるものと解釈される。現実に近い値を得るには、遮蔽効果を加味した以下のSlater則<sup>[5, 6]</sup>を用いるとよいとされている。

### Slaterによって提案された規則

規則 1. 主量子数  $n_i = 1$  (K), 2 (L), 3 (M) に対して、原子番号  $Z$  の原子における有効量子数  $Z_{eff}$  (effective quantum number) を、次のように定義する。

$$Z_{eff} = Z - S_i \quad [ S_i : \text{遮蔽定数} ] \dots\dots (10)$$

規則 2. 軌道による遮蔽効果の相違。

1. 軌道を [1s] [2s, 2p] [3s, 3p] [3d] [4s, 4p] [4d] [4f] [5s, 5p] … と分類する。
2. 問題とする軌道 ( $n$ ) より外側の軌道の電子による遮蔽は考えない。
3. 同じ殻の電子からは各電子につき  $S_i = 0.35$  とする。
4. 1s 軌道の電子に対しては  $S_i = 0.30$  とする。

5.  $(n-1)$  の軌道の電子においては  $S_i = 0.85$ ,  
 $(n-1)$  より内側の軌道電子に対しては  $S_i = 1$ , とする。
  6. d, f 軌道の電子は, 内側の殻上のすべての電子に対して  $S_i = 1$ , とする。
- 以上のルールに則り, 原子量 7 のリチウムのエネルギー準位を求めると, 表 3 のようになる。

表 3. Slater則を適用して求めたエネルギー準位 (比較のため実験値を再掲)

エネルギー準位 [eV]	
Slater則による計算結果	実験値
$E_1 = -65.9$	$E_1 = -58$
$E_2 = -5.8$	$E_2 = -5.39$

この表 3 の値<sup>[7]</sup>を用いて, リチウムの位置エネルギー準位を表すと図10のようになる。破線は, それぞれの位置を関数とした位置エネルギーである (本文中では「境界」と述べている)。

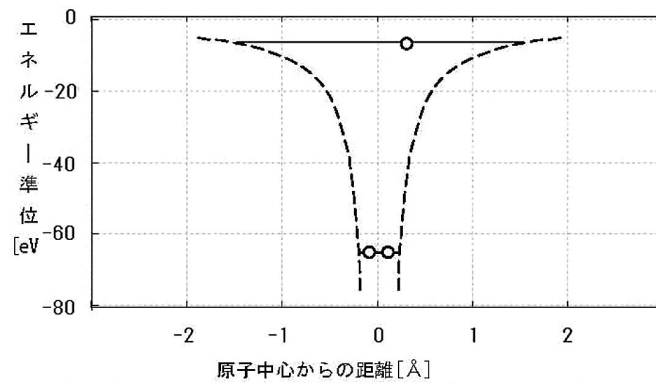


図10. Slater則を用いて算出した, リチウム ${}^7\text{Li}$ のエネルギー準位と電子の軌道半径。

### A 3. 金属リチウム ${}^7\text{Li}$ に見られるエネルギー準位と「境界」

リチウム原子 2 つを, 金属リチウムの原子間距離 (格子定数 =  $3.5 \text{ \AA}$ ) だけ離して並べて, 位置エネルギーの曲線とエネルギー準位との関係調べてみる。図11に示すように, 隣り合う位置エネルギーを示す破線に重なりができる。これらを足し合わせると, 太い実線で示すような新たな境界ができる。この新たな境界の出現によって, L殻の電子は隣の原子にも自由に移動することができる。これが自由電子の正体である。

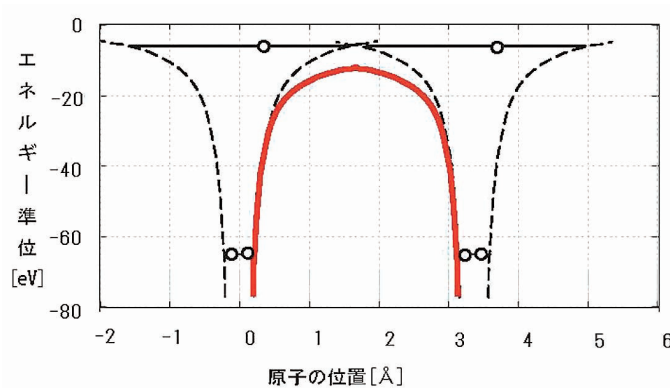


図11. 格子定数 ( $3.5 \text{ \AA}$ ) の距離だけ, 2 つのリチウム原子を離して並べたときの, エネルギー準位と「境界」。



さらにいくつかのリチウムを並べた状態を図12に示した。原子の位置は、格子振動によって時々刻々と変化する。そのため、リチウム原子同士が近づいたり、離れたたりしている。離れた所では、足し合わせた「境界」が高くなり、あたかも壁のように電子の移動を遮断し、これが「抵抗」となる。

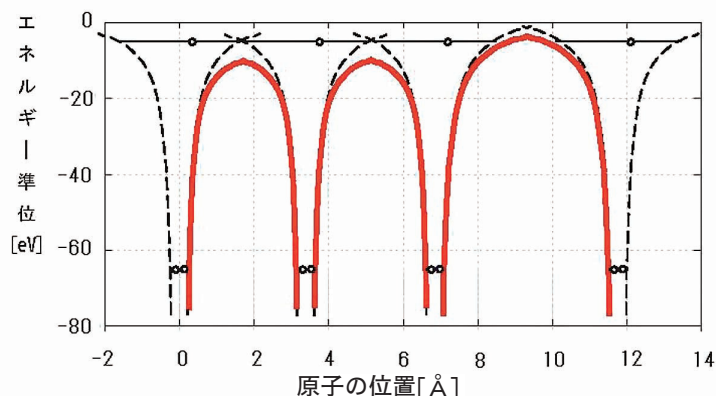


図12. リチウムを複数個並べた時のエネルギー準位と「境界」の様子。

金属の温度が上がる、すなわち格子振動が激しくなると、壁のように立ちのぼる新たな境界がいたるところで生じるようになり、抵抗も大きくなる。格子振動に起因する「高い壁」がほとんどなくなり、エネルギー準位 ( $n = 2$ ) を超えるような壁ができないほどの低温になると、抵抗値が0となる超伝導状態が生じるのである。

## 引用文献等

- [1] 「未来へひろがるサイエンス 1分野上」, 啓林館, p.44 (平成17年2月)
- [2] 「小学校学習指導要領解説『理科編』」, 平成20年8月p.4, および「中学校学習指導要領解説『理科編』」, 平成20年9月p.4
- [3] 「未来へひろがるサイエンス 1分野下」, 啓林館, p.131 (平成17年2月)
- [4] 「高等学校物理Ⅱ」, 啓林館, p.246 (平成15年3月)
- [5] 中性のリチウム原子に対する値である。“<http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/People/Itoh/5.pdf>”より。  
リチウムの1s軌道電子のエネルギー準位に対しては、中性原子の場合-58eV, +1イオンでは-75.6eV (第二イオン化エネルギーに対応する), +2イオンでは-122.4eV (表2の  $E_1$  に対応する) と記載されている。より詳しくは、円軌道間のX線のエネルギーの測定にもとづいて準位を決める方法もある (X-Ray Data Booklet [October 2009], Lawrence Berkeley National Laboratory, <http://xdb.lbl.gov/>)
- [6] 「物質の量子理論Ⅰ」, J.C.スレーター著, 大森他訳, 共立全書506, p.272 (昭和32年1月)
- [7] 計算結果は実測値の58eVと若干ずれているが、本稿の主題は規則的的確性を述べることではないため、このずれは無視していただきたい。

