

# 新指導要領に対応した教材研究 III

## (原子の大きさとアボガドロ定数を実感する実験)

(化学教室) 大橋淳史

### Development of teaching materials in chemistry to meet the new course of study (III)

Experiment to study the size of atoms and Avogadro constant using the metal plates

Atsushi Ohashi

(平成25年7月24日受理)

#### 欧文抄録：

A simple method to obtain the atomic radii and Avogadro constant using the three metal plates not only in the face- and body-centered cubic lattices but also in the hexagonal closed-packing lattice was developed.

キーワード：原子半径，アボガドロ定数，原子，atomic radius, avogadro constant, atom

#### 1. はじめに

すべての物質は目に見えないほど小さな原子によって構成されている。これは化学においてもっとも基本的な学習内容であるが、子どもたちは原子を目で見ることができないため、原子の存在や大きさを実感できていない。特に高校化学では、原子の構造や原子の大きさの周期性、原子の集まりの単位であるアボガドロ定数といった原子に関わる重要な内容を学習するようになるが、生徒は原子の存在を実感できないまま、受験対策のために丸暗記する傾向が認められる。

そこで本研究では、新指導要領が完全施行された高校化学領域において、原子に焦点を当てて、原子の大きさや集まりを実感できる教材の開発を計画した。具体的には、もっとも基本的な原子の集まりである金属原子に注目し、金属原子の集まりである金属結晶の構造を用いて、原子の大きさ、アボガドロ定数を実感する実験を行うことを計画した。また、発展的要素として、得られた原子半径の値から原子の大きさと周期性を考え、原子半径と原子の構造にはどのような関係があるのかという考察を行った。学習教材としては、身近な金属として鉄、銅、

亜鉛の3種類の金属板を用意し、高校化学で学習する金属結晶の原子半径の定義を使って、原子半径、アボガドロ定数を導出することを計画した。この計算により、私たちの生活する大きさ(1 m)から原子の大きさ( $10^{-9}$  m)を体感させ、またアボガドロ定数の  $6.02 \times 10^{23}$  という途方もない大きさが実際にありえるのかどうかを実感させることを目的とした。

#### 2. 実験方法

山本<sup>1)</sup>によりアルミニウム、鉄、銅、亜鉛の4種類の金属板を用いて、アボガドロ定数を算出する方法が提案されている。そこで、この方法を参考に新たな実験を計画した。山本の報告では、4種類の金属の原子半径を与え、4種類の金属板から同様にアボガドロ定数を計算させており、旧指導要領に沿った内容になっている。この報告を参考に、学習内容を新指導要領に合わせて、原子半径を与える金属をひとつとして、計算によって導出したアボガドロ数から他の金属原子の半径を決定することとした。また、六方最密充填構造については学習指導要領範囲外であるため、単位格子の3辺を与えて計算

させている。そのため、面心立方格子、体心立方格子の説明で用いられる原子を剛体球と見なす概念(図 1, 図 3)が考察に活かすことが難しい。そこで、本研究では、六方最密充填構造について、指導要領内で学習できる計算方法を提案し、原子の大きさと原子の構造を実感させるよう実験方法を改良した。さらに、遷移金属元素では、高校化学で学習する「原子番号の増加と共に原子半径は減少する」とは異なる傾向が観察される。これを考察課題として、かつては高校で学習していた原子軌道論の有用性について考察を行った。

実験方法としては、まず銅原子の原子半径を与え、その値を用いてアボガドロ定数を導出させた。そして、得られたアボガドロ定数の計算値を用いて他の金属原子の原子半径を計算させた。

原子半径を実際に自分自身で計算するように実験方法を変更することで、原子半径と原子構造の相関性についての学習も合わせて行うことを計画した。

### 2.1. 実験器具

実験器具として、鉄、銅、亜鉛の金属板(20 mm × 70 mm ; NaRiKa)、関数電卓、デジタルノギスを用意した。原子半径を算出するためには三乗根を解く必要がある。そのために関数電卓が必要であった。関数電卓は2000 円/個のもっとも安価なもので問題ない。デジタルノギスは0.01 mm スケールの精度の製品を用意した。測定する金属板の厚さが0.1 mm スケールであったため、精度の確保には最低でも0.01 mm スケールが必要であった。ナリカ社で取り扱われているAND社のデジタルノギス(AD-5765-150)は2,300 円/個と安価であるため、精度を確保しつつ数を揃えることが可能であった。

### 2.2. 銅板を用いたアボガドロ定数の計算

まず銅板を与えて、デジタルノギスで3 寸を計測させた。一例を以下に示す。

長さ : 70.00 mm

幅 : 20.00 mm

厚さ : 1.01 mm

デジタルノギスは、挟むだけで数値が表示されるため、通常のノギスのように使い方に習熟する必要がなく、ノ

ギスを利用したことがない生徒・学生でも問題なく使用できた。

次に精密天秤で、質量は12.469 gであった。精密天秤は非常に高価であるため、新たな購入は難しいが、有効数字を確保するため最低でも0.01 gスケールは必要である。

得られた銅板の質量を、銅板の体積で除算することで金属銅の密度の実測値を導出した。

$$\text{密度} : 12.469 \text{ (g)} \div (7.000 \times 2.000 \times 0.101) \text{ (cm}^3\text{)} = 8.91 \text{ g/cm}^3$$

金属銅の密度の文献値は8.9 g/cm<sup>3</sup>(理化学辞典)である。そこで、相対誤差を計算した。

$$\begin{aligned} \text{相対誤差} &= |8.91 - 8.9| \div 8.9 \times 100 \\ &= 0.1 \% \end{aligned}$$

相対誤差は0.1 %であり、極めて高い精度であった。

次に得られた密度の実測値と高校化学で学習する金属結晶の構造式からアボガドロ定数を導出した。銅の金属結晶は面心立方格子である(図 1)。

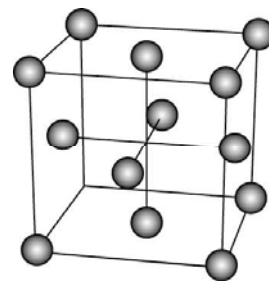


図 1. 面心立方格子構造

図 1 から高校化学では以下のように単位格子の密度と原子半径の関係を学習する。単位格子中の原子数は  $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$  個である。そこで、密度  $d$ 、原子量  $M$ 、アボガドロ定数  $N$ 、単位格子 1 辺の長さ  $a$  とすると、面心立方格子の密度  $d$  は以下のように与えられる。

$$d = 4M/a^3N$$

ここで単位格子 1 辺の長さ  $a$  は、図 2 より原子半径を  $r$  とすると、ピタゴラスの定理によって、以下の関係にある。

$$r = (\sqrt{2}/4)a$$

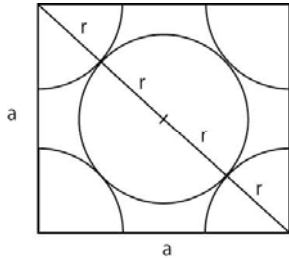


図 2. 単位格子 1 辺と原子半径の関係

2 式を合わせると、以下のようになる。

$$d = 4M/\{(4/\sqrt{2})r\}^3 N\}$$

本実験では、アボガドロ定数  $N$  を導出するのが目的であった。そこで、銅の原子半径  $r$  を文献値(理化学辞典)から  $0.128 \text{ nm}$  とし、原子量  $M$  も文献値(理化学辞典)から  $63.55$  とした。密度  $d$  は既の実測値が得られた。これらの値を代入し、アボガドロ定数  $N$  を導出した。

$$N \doteq 6.01 \times 10^{23}$$

得られたアボガドロ定数は理論値  $6.023 \times 10^{23}$  と比較して、相対誤差  $0.22 \%$  であった。密度を導出したときよりも、アボガドロ定数の精度が若干下がった。そこで、この精度の変化について実践(後述)において考察課題とした。これにより、何故誤差が起こるかについて意識させた。

### 2.3. 鉄板を用いた原子半径の計算

銅板と同様に鉄板もデジタルノギスで採寸した。

長さ :  $70.00 \text{ mm}$

幅 :  $20.00 \text{ mm}$

厚さ :  $1.00 \text{ mm}$

続いて精密天秤で質量をはかった。

質量 :  $10.366 \text{ g}$

密度の実測値を得た。

密度 :  $7.40 \text{ g/cm}^3$

そして、金属結晶の構造式から、原子半径を導出した。鉄は体心立方格子である(図 3)。

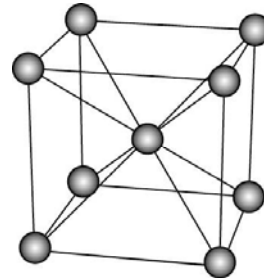


図 3. 体心立方格子構造

図 3 より、単位格子中の原子数は  $1/8 \text{ 個} \times 8 + 1 = 2$  個である。そこで、密度  $d$ 、原子量  $M$ 、アボガドロ定数  $N$ 、単位格子 1 辺の長さ  $a$  とすると、面心立方格子の密度  $d$  は以下のように与えられる。

$$d = 2M/a^3 N$$

ここで、単位格子 1 辺の長さは、図 4 より原子半径を  $r$  とすると、ピタゴラスの定理によって、以下の関係にある。

$$r = (\sqrt{3}/4)a$$

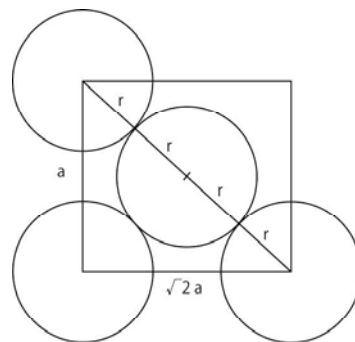


図 4. 単位格子 1 辺と原子半径の関係

先ほどと同様に 2 式を合わせると以下のようになる。

$$d = 2M / \left\{ \left( \frac{4}{\sqrt{3}} \right) r^3 N \right\}$$

原子量  $M$  は 55.85,  $d$  は実測値,  $N$  は 2.2 節で求めたアボガドロ定数を用いると鉄の原子半径  $r$  は以下のようになる。

$$r \doteq 0.1268 \times 10^{-9} \text{ m} \doteq 0.124 \text{ nm}$$

得られた鉄の原子半径は文献値(理化学辞典)の 0.124 nm と比較して, 相対誤差 0 % であった。実践において, この測定では誤差は 0 % と判断して良いのかについて考察課題とした。これにより, 精度と誤差の関係を意識させた。

## 2.4. 亜鉛板を用いた原子半径の計算

亜鉛は六方最密充填構造である。この格子構造は通常図 5 のように表される。

しかしながら, 実際には図 5 の六角柱構造は, 単位格子ではない。単位格子は平行四辺形柱であり, 六角柱構造は平行四辺形柱が 3 つ合わさった形なのである。これが六方最密充填構造の理解を難しくしている要因である。実際には六方最密充填構造は, 面心立方格子と類似の形状である。

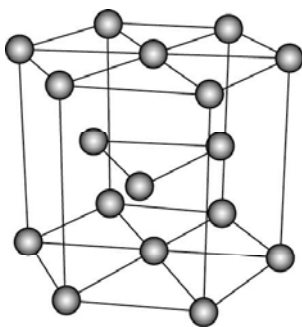


図 5. 六方最密充填構造

六方最密充填構造の密度の求め方, 単位格子 1 辺と原子半径の関係は, 学習指導要領の範囲外であり, また理系の学部でもあまり学習しない。これは結晶学を専門とする教員が少ないことに起因している。そこで, 本研究では, 充填率を用いた簡易的な計算法と他の結晶格子と同様に単位格子と原子半径から計算する方法, 2 つの

方法により亜鉛の原子半径を計算する方法を示した。

亜鉛板を実測値と密度を以下に示す。

長さ : 70.01 mm

幅 : 20.03 mm

厚さ : 1.00 mm

質量 : 10.0332 g

密度 : 7.05 g/cm<sup>3</sup>

### 2.4.1. 充填率を用いた原子半径の計算

図 1, 3, 5 から金属結晶の金属原子の詰まり方は, 金属原子を剛体球として見なしている。この結晶中で, 球体の体積が単位格子中の全体積のどの程度を占めているかを, 空間充填率とよぶ。空間充填率は新指導要領では化学基礎の発展および化学において導出する過程が示されるようになった。そこで, 空間充填率を使った六方最密充填構造の原子半径の導出方法ならば高等学校教員でも指導できること, また計算は基本的に中学校数学の範囲であるため生徒でも理解できると考え, 空間充填率を使った原子半径の導出を検討した。

まず原子 1 個の体積を計算した。

$$\left( \frac{4}{3} \pi \right) r^3 \text{ (cm}^3\text{)}$$

六方最密充填構造は空間充填率 74 % であるため, 結晶 1 cm<sup>3</sup> では, 原子は 0.74 cm<sup>3</sup> の体積を占めている。そこで, 原子の密度  $d'$  は金属結晶の密度  $d$  と以下の関係にある。

$$d' = d/0.74$$

これらより原子 1 個の質量は以下のように表すことができる。

$$\left( \frac{4}{3} \pi \right) r^3 \times d' = \left( \frac{4}{3} \pi \right) r^3 \times d/0.74$$

原子 1 個の質量は原子量とアボガドロ定数からも求めることができる。そこで, 2 式を合わせると以下のよう表すことができる。

$$(4 \pi / 3) r^3 \times d / 0.74 = M / N$$

周期表より原子量  $M$  は 65.38,  $d$  は実測値,  $N$  は 2.2 節で求めたアボガドロ定数を用いると亜鉛の原子半径  $r$  は以下ようになる.

$$r \doteq 1.40 \times 10^{-8} \text{ (cm)} = 0.140 \text{ nm}$$

空間充填率を用いて計算することで, 高校化学の指導要領内で, 六方最密充填構造の原子半径をアボガドロ定数と密度, 原子量から得ることが可能であることを明らかにした. 得られた原子半径の相対誤差は 5 % であった.

#### 2.4.2. 構造からの原子半径の計算

面心立方格子や体心立方格子と同様に単位格子とそれに接する原子という観点から, 単位格子を原子半径の式として導出し, 単位格子の密度から原子半径を求めた. 六方最密充填構造で単位格子 1 辺と原子半径の関係を考えるときに重要となるのが結晶格子の高さである. そこで図 5 の六角柱の高さを導出した.

図 5 の有色の原子のみに注目すると, これらは正四面体が上下に重なった形になっていることがわかる. 結晶格子の高さを  $X$  とすると,  $X$  は 1 辺  $2r$  の正四面体の高さの 2 倍と求められる.

正四面体の高さ  $EF$  は図 6 から求められる.

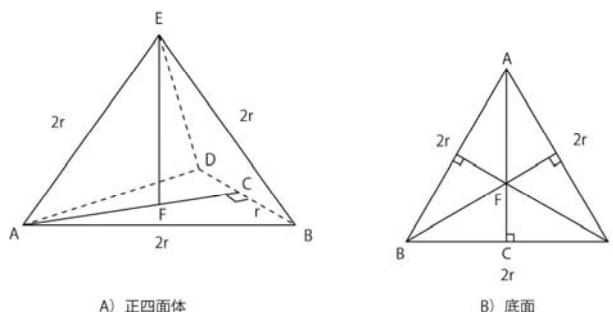


図 6. 正四面体の高さ

正四面体を構成する正三角形は 1 辺が原子直径  $2r$  である. また,  $F$  は図 6B の底面  $ABD$  の重心にあたる. そこで, 図 6A の  $EF$  を求めるには, まず  $AF$  を求めれ

ばよい. 図 6B の底面から, ピタゴラスの定理より,  $AC : BC = \sqrt{3} : 1$  であり,  $AC$  の長さは  $AC = \sqrt{3} \times BC = \sqrt{3} \times 2r$  である.

また,  $CF : BF = 1 : 2$  より,  $AF = BF$  から,  $AF : CF = 2 : 1$  である. このことから,  $AF : AC = 2 : 3$  である. これより,  $AF$  は以下のように求められる.

$$AF = 2/3 \times AC = (2/\sqrt{3}) \times r$$

正四面体の高さ  $EF$  は, 以下の式により求められる.

$$AE^2 = EF^2 + AF^2$$

$AE = 2r$ ,  $AF = (2/\sqrt{3})r$  を代入して計算すると,  $EF$  は以下のように求まる.

$$EF = 2 \times \sqrt{(2/3)} \times r$$

そこで, 六方最密充填構造の単位格子の高さ  $X$  は以下のように表すことができる.

$$X = 2 \times EF = 4 \times \sqrt{(2/3)} \times r$$

これにより, 図 4 の六角形柱の高さが求まった. 六角形柱の体積を計算するには, 底面積を計算する必要がある. 正六角形の面積  $S$  は以下の式により求められる.

$$S = (3\sqrt{3})/2 \times (2r)^2$$

六角柱の体積  $V$  は以下の式で求められる.

$$V = X \times S = 24\sqrt{2} \times r^3$$

六方最密充填構造は単位格子中の原子数は図 4 より, 6 個である. そこで, 六方最密充填構造の密度  $d$  は以下の式で求められる.

$$d = 6M/VN$$

原子量  $M$  は 65.38,  $d$  は実測値,  $N$  は 2.2 節の値を用いると亜鉛の原子半径  $r$  は以下ようになる.

図 7. ボーアの原子モデル

$$r \doteq 1.397 \times 10^{-8} \text{ (cm)} = 0.140 \text{ nm}$$

相対誤差は空間充填率で計算した場合と同じであった。

### 3. 原子半径と原子構造

2 節の実験により、鉄と亜鉛の原子半径が求められた。最初に与えている銅の原子半径を加えて、3 つの金属元素の原子半径を原子番号の順に記載すると表 1 のようになる。

表 1. 原子番号と原子半径の関係

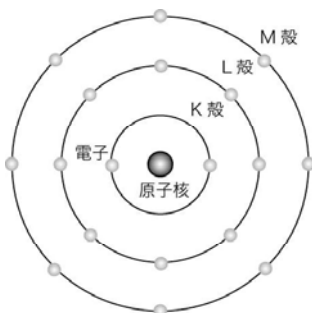
元素	原子番号	原子半径 (nm)	相対誤差 (%)
鉄	26	0.124	0
銅	29	0.128	-
亜鉛	30	0.140	5

表 1 より、遷移金属元素である鉄、銅、亜鉛は、原子番号が大きくなるに従って、原子半径が大きくなっている。しかしながら、高校化学で学習する典型元素の原子半径は原子番号が大きくなるに従って小さくなると学習する。高校化学の学習内容と実験事実の差異について考察させた。

原子半径と原子番号との関係は、原子の構造によって説明される。しかしながら、高校化学の指導要領では、原子の構造についてボーアの原子モデルで学習するために、遷移金属の原子番号と原子半径の関係について教えることができない。

#### 3.1. ボーアの原子モデル

高校化学で学習する原子の構造は中心に原子核があり、その周りに K, L, M 殻…と電子殻があるボーアの原子モデルである (図 7)。



ボーアの原子モデルでは、内側の軌道より順番に電子が入っていき、K 殻に 2 個、L 殻に 8 個、M 殻に 18 個まで電子が入るが、高校化学では、第 3 周期の原子番号 18 のアルゴン (M 殻に電子が 8 個) までしか学習しない。原子番号 18 まではすべて典型元素である。そこで、前述の通り、高校化学では原子番号が大きくなると、原子核の正電荷が電子殻の負電荷と静電的引力によって引き合う力が強くなる。これによって、原子番号が大きくなる (陽子数が増える) ことによって、原子半径は小さくなる。

一方で、第 4 周期から現れる第 3 ~ 11 族の遷移金属元素については、高校化学ではどのような構造をしているのかの説明はない。高校化学において遷移金属元素の原子構造について言及がないのは、ボーアの原子モデルでは遷移金属元素を説明できないことに起因する。

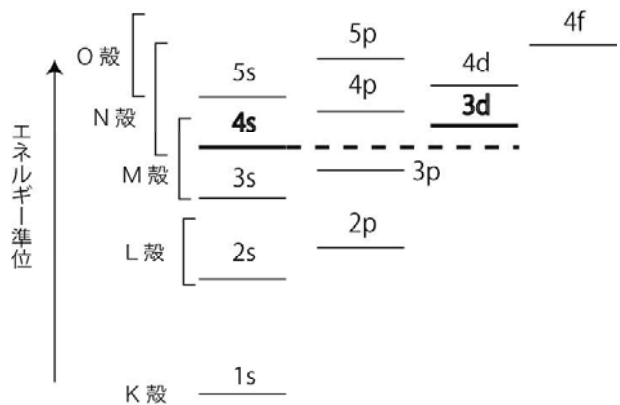


図 8. 原子軌道

原子の構造は、初期にはボーアの原子モデルで説明されており、このモデルは非常に簡便に原子の構造を理解できることが利点である。しかしながら、実際の原子の構造はボーアの原子モデルより複雑である。ボーアの原子モデルの電子殻はシュレーディンガーの波動方程式により、さらに細分化できることがわかった。これは原子軌道とよばれる (図 8)。原子軌道は下にあるものほど低エネルギーであるため、電子は下の軌道から順に埋まっていく。これは図 7 において電子が K 殻から順に埋まっていくことに対応している。図 8 では p 軌道は簡易的に 1 つの軌道で表されているが、実際には同じエ



エネルギー準位の 3 つの軌道がある。d 軌道も同様に同じエネルギー準位の軌道が 5 つある。f 軌道には 7 つの軌道がある。

表 2 より、ボーアの原子モデルの電子殻では、2, 8, 18(8)個と一定でなかった電子の収容量は、実際には原子軌道の数によって規定されている。1 つの原子軌道には電子 2 個を収容され、原子軌道の数で電子の最大収容数が決まるのである(表 2)。

表 2. 電子殻と原子軌道の関係

電子殻	電子数	原子軌道	電子数
K 殻	2 個	1s	2 個
		2s	2 個
L 殻	8 個	2px	2 個
		2py	2 個
		2pz	2 個
M 殻	18 個	3s	2 個
		3px	2 個
		3py	2 個
		3pz	2 個
		3d	10 個
N 殻	18 個	4s	2 個
		4px	2 個
		4py	2 個
		4pz	2 個
		4d	10 個
		4f	14 個

ここで問題になるのは、3d 軌道と 4s 軌道の関係である。電子殻で考えれば、M 殻に電子が収容されてから N 殻に電子が入るはずである。しかしながら、図 8 より実際には 3d 軌道より 4s 軌道の方が、エネルギー準位が低い。つまり、電子は 3p 軌道に 6 個収容された後、3d 軌道ではなく、4s 軌道に先に 2 個収容される。これを原子番号で考えると原子番号 18 で 3p 軌道が埋まり、原子番号 19, 20 で 4s 軌道が埋まる。3d 軌道に電子が収容されるのは、原子番号 21 から原子番号 30 の間である。この原子番号 21 から原子番号 30 の間が、遷移金属元素である。これをボーアの原子モデルで考えると

遷移金属は図 9 の状態で M 殻に電子が収容されていることになる。

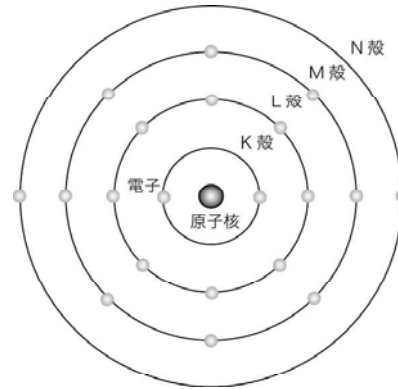


図 9. ボーアの原子モデル(カルシウム)

これが典型元素と遷移金属元素での原子番号と原子半径の傾向の差異を示している。典型元素では、電子は常に最外殻に収容される。したがって、原子核の正電荷と電子の負電荷の静電的引力によって原子半径が決定される。そこで、原子番号が大きくなり、原子核の正電荷が大きくなると電子はより原子核に引きつけられ、原子半径は小さくなる。一方、遷移金属元素では、電子は最外殻ではなく、その内側の電子殻へ収容される。図 9 で、M 殻の電子数が増加すると、徐々に M 殻電子による原子核の正電荷の遮蔽が起こり、N 殻電子は原子核からの正電荷の影響を受けにくくなる。すると、N 殻電子は原子核からの静電的引力が弱まり、殻が外側に広がっていく。これにより原子半径は増大することになる。そのため、遷移金属元素では、5 つの 3d 軌道に収容される電子 10 個のうち、電子の半分が収容される原子番号 25 のマンガンまでは原子番号が大きくなるに従って原子半径は小さくなり、原子番号 26 の鉄から原子番号 30 の亜鉛に向かっては原子半径が大きくなる傾向を示す。これを本研究で用いた鉄、銅、亜鉛で確認すると(表 1)、鉄から銅へは原子番号は 3 増加しているが、原子半径の増加は 3 %であった。しかしながら銅と亜鉛では、原子番号の増加は 1 であるにも関わらず、原子半径の増大は 9 %になった。これは原子番号 30 で 3d 軌道がすべて埋まることと相関性がある。

#### 4. 実践

本内容について、教育学部 2 回生を対象とした理科教育法 I(実験実習)で 2 回(17 名, 15 名), 高校 2 年生を対象とした新居浜西高校 SPP「新西サイエンスエクスペリメント」で 1 回(3 名)の計 3 回実施を行った。

表 3. 教育学部 2 回生(15 名)の実践データ

	鉄板 (nm)	亜鉛板 (nm)
学生 1,2	0.125	0.139
学生 3,4	0.124	0.139
学生 5,6	0.126	0.137
学生 7,8	0.126	0.139
学生 9,10	0.124	0.139
学生 11,12	0.125	0.139
学生 13,14	0.125	0.138
学生 15	0.128	0.140
文献値 (理化学辞典)	0.124	0.133

計 3 回の実践ではいずれもアボガドロ定数, 鉄, 亜鉛の原子半径は, 同様の結果が得られた。唯一, 高校 2 年生では 3 乗根の計算に問題があったが, 関数電卓を利用して計算方法を解説することにより, 3 名の高校生はいずれも原子半径を導出することに成功した。実践により得られたデータの一例を表 3 に示す。実験は 2 人 1 組で行った。

表 3 の実践では, 鉄の場合の相対誤差は 0 ~ 3.2 % で標準偏差は 0.98 であった。亜鉛の場合は, 相対誤差 3.0 ~ 5.3 % であり, 標準偏差は 0.62 であった。鉄と亜鉛のデータを比較すると, どちらも誤差が大きい場合は, アボガドロ定数による誤差が大きく, 金属板によって誤差が異なる場合には, 測定の誤差, もしくは金属板そのものによる誤差の影響が大きいのであろう。

#### 5. まとめ

「原子は目に見えないほど小さな粒子であり, 基本的には剛体球と見なすことができる」というのは化学における基本事項であるが, この理解が乏しい学生が散見される。これら学生は, 化学は暗記すればよいと考えているため, 実感を伴った理解を得られていない。そこで,

金属板を用いて, 我々の身近な単位(m, g)から, 10<sup>-9</sup> m(nm) 単位の大きさを計算によって導出が可能であることを示し, 原子の小ささ, アボガドロ定数の大きさ, また, 得られた原子半径は原子の構造と深い相関性があることを実感させることを目的とした。

2.2 節の銅板の測定により, 有効数字の意味とその影響について考察させることが可能であることを示した。科学は測定によって得られた数値に立脚した学問であり, 得られた数値がどこまで信頼できるのかを常に考慮する必要がある。しかしながら, 現職の学校教員であっても, その意味を真剣に捉えていない状況が散見される。そこで, アボガドロ定数の導出を通して, 得られた実験値はどこまで信頼できるのかを考察させることは極めて重要であることを示した。

得られたアボガドロ定数は理論値と比較して相対誤差 0.22 % であった。デジタルノギスによる 0.01 mm 精度の測定から, 良好な精度でアボガドロ定数の導出が可能であることを示した。用いたデジタルノギスは安価であり, 高価なノギスを選ぶ必要がないことが示された。またデジタルノギスは数値が表示されるため, ノギスの使い方を教える必要がない点も有用であった。

鉄板の原子半径の導出では相対誤差 0 % という結果が得られた。しかしながら, これは誤差が存在しないということではない。見かけ上の数値で考えれば誤差は 0 % であるが, 四捨五入している点, アボガドロ定数にそもそも誤差が含まれる点に注意が必要である。密度についても実測値は理論値と誤差がある。つまり, 原子半径の実測値は理論値と相対誤差 0 % となったが, 実際には誤差と誤差が重なり合った結果, 偶然 0 % となったのであり, この結果をもって, 理論値を相対誤差 0 % で求めたということとはできない。測定には必ず誤差が含まれており, 精度について考察する場合には, 数値の大小ではなく, その中に含まれている誤差についても理解しなくてはならない。そのためには, 得られた数値がどこまで信頼できるのかという有効数字の概念が重要であることが再確認できた。

六方最密充填構造の密度や原子半径と単位格子の関係については, 高校化学でも高等教育でも学習しない。そのため山本の報告では, 六方最密充填構造の格子定数を与えて, 亜鉛原子のアボガドロ定数を計算させている。



この方法は指導要領内で学習させるという点では適している。一方で、六方最密充填構造では剛体球としての原子を意識することがないため、結晶格子への実感があいまいになる。結晶格子は本来、剛体球と見なした原子の詰まり方には 2 種類しかないという最密充填の考察から生まれたものである。しかしながら、六方最密充填構造については、剛体球の詰まり方を考えさせないことで、単なる暗記だと誤解させる可能性がある。

そこで、指導要領内で六方最密充填構造が剛体球の集合であることを教える方法として、空間充填率を用いた原子半径の導出法を示した。各結晶格子の空間充填率は高校化学において学習している。また空間充填率をどのように導出するかという問題は高校化学の教員採用試験でも出題されている。そこで、これを組み合わせることで、空間充填率、つまり球体の占有率から原子半径を計算することが可能であることを示した。空間充填率の計算方法は球体の体積が計算できれば導出可能である。球体の体積の求め方は新指導要領で中学校に復活しているため、中学校の数学の知識があれば導出可能である。また、単位格子の体積を求める手法も検討した。こちらも場合でも中学校数学の範囲で原子半径を求められることを示した。どちらを用いるかは、生徒(学生)の学力に応じて選択できるが、後者の方は導出法が統一される点が優れている。得られた相対誤差は 3 ~ 5 % であり、良好な精度で原子半径が求められることを示した。

亜鉛板の精度は鉄板に比べて低くなっている。これにはいくつかの理由が考えられるが、もっとも顕著な違いとして亜鉛板の角取りが挙げられる。亜鉛板とアルミニウム板は見た目が非常によく似ており、目視では判別が難しい。そこで、ナリカ社では、目視で判別するために亜鉛板の角を丸く処理している。本研究では、金属板の 3 辺をデジタルノギスで計測して体積を導出しているが、この「丸み」は補正していない。そのため、亜鉛板では体積が実際より大きく見積もられていた。これによって、密度が実際より小さくなり、計算上、原子半径が実際より大きくなる。これについては考察課題としたが、実験の際に金属板をよく観察していた学生は、誤差の原因に気づくことができた。単なる測定ミスと考えがちな誤差について、合理的理由があることを示し、考察の重要性について認識させることに成功した。

表 1 より、得られた原子半径は原子番号の増加に従って、原子半径が増加していることが示された。そこで、この原因について、学生に考察を行わせた。ボーアの原子モデルだけでは、遷移金属元素の原子半径が増加する理由が説明できない。しかしながら、原子軌道論を導入すれば、原子の構造と電子配置の関係についてより深い考察が可能となることを示した。原子番号 21 から原子番号 30 の遷移金属元素では、4s 軌道(N 殻)に先に電子が 2 個収容されることが原子半径を考察する際にもっとも重要な要因であった。諸外国では、高等学校における原子構造の学習では、既に原子軌道論による説明が主流となっており、我が国でも過去には原子軌道論を高等学校で学習していた。原子軌道論の学校教育への復活が、原子の構造の理解にとって、重要な課題であることが改めて示された。原子軌道論を学習することで、初めて遷移金属元素の構造についての理解が可能となるだろう。また、原子軌道論によって電子のスピン概念が導入され、常磁性、反磁性という磁性と物質の関わりも理解できるようになる。

金属結晶は高校化学において重要な領域であり、受験においても頻出の分野であるが、実際の学習は単なる暗記に終始している。教育学部 1 回生を対象に「金属結晶格子を斜めに切断したら、どのように見えるか」という問いを出したが、ほとんどの学生は正解を導くことができない。多くの学生は原子を剛体球と見なしたときの球体の詰まり方が金属結晶格子の基礎概念であることが理解できていないことが伺える。

本研究を通して、我々に身近な金属は目に見えないほど小さな原子の剛体球が集まってできていることを実感させることで、金属結晶格子を理解させることに成功した。

今後は、金属結晶構造について、より理解しやすい教材の開発を行っていく予定である。

#### 引用文献

- 1) 山本勝博 科学教育研究, vol.27, No.3, 186-193 (2003).

