

博物学的魅力の周期表元素、驚きと発見で好きになる理科実験、 百聞は一見に如かずの分子軌道 —過去から未来への時間軸の中、物質の世界で生きる私たちにとっての化学—

(岡山理科大学 基盤教育センター長) ^{さかね げんた}坂根 弦太

1. はじめに

石器時代、青銅器時代、鉄器時代から現代まで、私たちは有益な物質を得て生活に活用してきた。人類が知り得た化学物質はアメリカ化学会のCASが登録しており、発行済のCAS登録番号は現在、2億1900万種類とのことである¹⁾。化学の研究開発で得られた知識や技術を社会で活用するためには、化学の専門家を社会で育成し続けなければならない。しかし日本では現在、大学がユニバーサル化²⁾し、講義では学生消費者主義³⁾のもと、受動的に教育サービスを受け取るだけの消費者になっている学生も多く⁴⁾、化学研究開発の社会実装で言えば、実装後の恩恵の「受け手側」の教育が大学の教養化学教育の中心である⁵⁾。実装する側の人材育成のためには化学系博士人材が必要であることは言うまでもない。しかし化学は19世紀に発達した学問、物理は20世紀に発達した学問と言われることがあり、大学生にとっては21世紀の現在、化学は華々しい分野とは思われていない節がある。

筆者は2002年度から現在までの22年間、西日本地方（岡山県、広島県、兵庫県、鳥取県、島根県、香川県、徳島県、愛媛県、高知県、福岡県、大阪府）の小学校、中学校、高等学校等へ出張し、児童、生徒等に元素、原子、電子の楽しさ、すごさを伝え、興味関心を持ってもらう活動を展開しており⁶⁾、日本化学連合の化学コミュニケーション賞2019を受賞している⁷⁾。化学に関する好奇心の芽を初等教育課程の児童たちに提供し、中等教育課程の生徒たちに実験を中心とした体験から化学を好きになっていただき、高等教育の学生には量子化学に躰かず大学院に進学していただきたい。その思いで実践してきた活動の中から、児童、生徒、学生の目が輝いた選りすぐりの実践を本講演では紹介する。

2. 博物学的魅力の周期表元素

2億1900万種類の化学物質も、周期表のたった118種類の元素の組み合わせに過ぎない。そして118種類の元素はそれぞれ、非常に個性的である。博物館や図鑑で子供たちは、恐竜、鉱物、昆虫などに惹かれる。元素にも博物学的魅力が満載である。しかも、集めようと思えばそこいらじゅうに元素はある⁸⁾。そして元素一覧表かつ化学の世界のガイドマップである周期表もいろいろある^{9, 10)}。

出張講義では子供たちに、世の中はつぶつぶの粒子である原子でできていることを伝える。原子と元素はどう違うかを説明し、見て触って驚きと発見のある元素としてジルコニウム（Zr）、スズ（Sn）、ビスマス（Bi）を紹介、子供たちはそれらが好きになって、もっと他の元素についても知りたくなる。



449 gの二酸化ジルコニウム



原子から耳に音が届くスズ



磁石に浮かぶビスマス

3. 安全で驚きと発見のある理科実験

人間、押し付けられた知識はなかなか身に付かないし、好きになれない。自らの経験で驚き、発見した知識こそが身に付き、夢中になれる可能性がある。しかし現在、中等教育では時間的、予算的制約から、化学に関する魅力ある実験が十分には実施できていない。教科書や写真資料集を見ただけでは、化学の本当の楽しさ、魅力には気付きにくい。そこで安価に、安全に、短時間で、驚きと発見のある理科実験を高等学校への出張講義や、大学での授業で実施してきた⁵⁾。今回は電気に関する実験、磁石に関する実験、有機ELディスプレイ発光錯体の合成に関する実験¹¹⁾を紹介する。

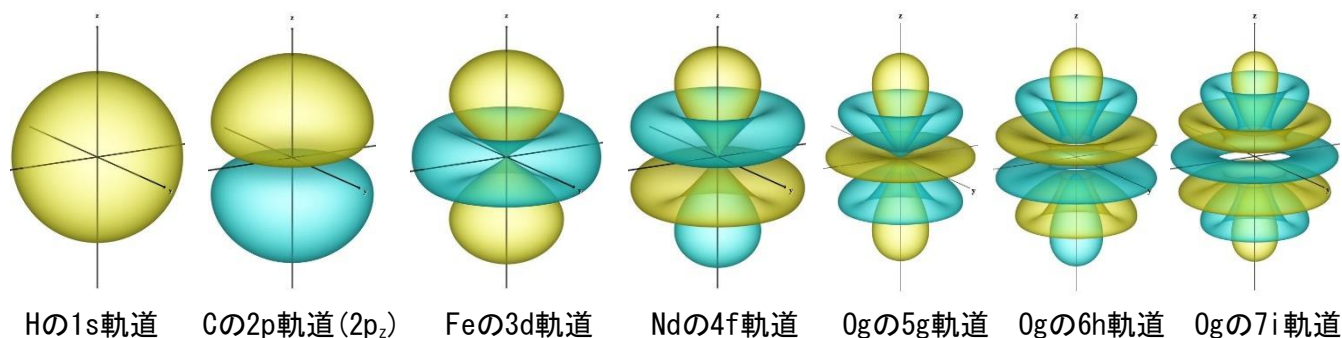
4. まずは見てみよう、原子軌道と分子軌道

原子と原子がくっついて分子になるとき、プラス電荷の原子核同士が接近しても反発せずに手をつなぐことができるのは、マイナス電荷の電子が接着剤の役割を果たしているからである。青い物質はどうして青いのか、磁石を近づけたときに引き寄せられる物質があったり、逃げようとする物質があるのはなぜなのか、電気が流れる物質と流れない物質、そしてその中間の半導体があるのはどういうことなのか、物質の世界である化学の主役の一つは「電子」である。

文部科学省が2018年（平成30年）に告示した高等学校学習指導要領に基づき、高等学校では2024年度の高校3年生から、新課程の教科書に基づいた授業が行われている。文部科学省の高等学校学習指導要領解説「理科編 理数編」（2018年（平成30年）7月、2021年（令和3年）8月一部改訂）¹²⁾の「第1部 理科編」－「第2章 理科の各科目」－「第5節 化学」－「3 内容とその範囲、程度」－「(3) 無機物質の性質」－「⑦典型元素について」の箇所には、[原子の電子配置については、カリウム原子では、M殻が最大収容数の電子で満たされる前にN殻に電子が収容される理由や、塩化物イオンでは、M殻が最大収容数の電子で満たされていなくても安定に存在できる理由に触れることも考えられる。]と解説されている。実際、新課程の「化学基礎」の教科書では、「電子軌道とカリウム原子の電子配置」というようなコラムで、1s軌道、2s軌道、2p軌道、3s軌道、3p軌道、3d軌道、4s軌道、4p軌道、4d軌道、4f軌道の取り扱いが見られる。

高校「化学基礎」でのK殻、L殻、M殻の説明（原子核と電子殻、電子配置の説明）ではしばしば、ボーアの原子モデル（太陽の周りを惑星が円を描いてぐるぐるまわっているように、原子核の周りを電子が円を描いてぐるぐるまわっているモデル）のような図が使われる。太陽を周回する惑星のように、電子は原子核を周回する「粒子」であると思ってしまう。ところが同じ「化学基礎」の教科書に電子の軌道についての説明があって、電子は原子核のまわりを惑星のようにまわっているのではなく、広がりをもった範囲で運動していて、この運動している電子の存在範囲が電子の軌道であって、s軌道は球形、p軌道は亜鈴形で…、と説明があって、1s軌道、2s軌道、2p_x軌道、2p_y軌道、2p_z軌道の図が出てくる。

ミクロの原子・分子・電子の世界がそうになっているのだから仕方がないのだが、実生活の経験と解離した不思議な量子化学の世界を魅力的だと思えずに拒絶してしまう（嫌いになってしまう）生徒達は多いように思われる。大学の教養課程の化学でも、量子化学の世界が実在する魅力あるものとは思えず、机上の空論で自分には関係のない（興味のない）分野と認識してしまう学生は少なくない。そこで筆者は2005年度より岡山理科大学での化学の授業で、学生一人一人がDV-X α 法を用いて原子や分子の電子状態を計算し、原子軌道や分子軌道を三次元可視化する実習を行ってきた¹³⁾。この計算システムは、ごく普通のWindowsパソコンに、ほぼ無償で環境を構築することができ（秀丸エディタのみシェアウェア）、メニューから元素名を選ぶだけで原子軌道をVESTA¹⁴⁾で三次元可視化でき、分子名を選ぶだけで分子軌道が計算され、分子軌道や静電ポテンシャルマップをVESTA¹⁴⁾で三次元可視化できる¹⁵⁾。周期表全元素対応。例えば磁気量子数=0の7種類の原子軌道を描いてみた¹⁶⁾。



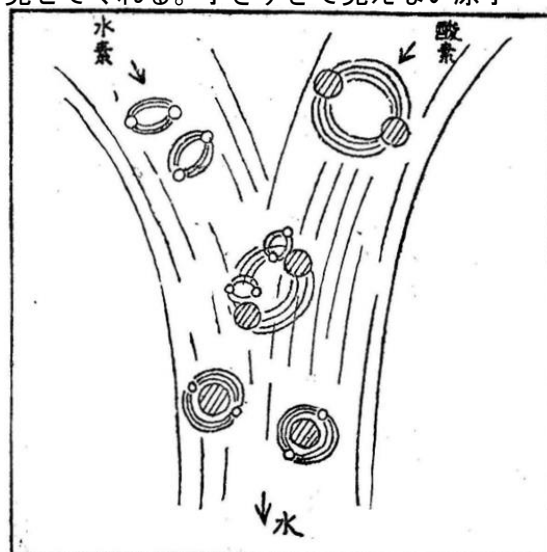
5. おわりに

昭和2年から4年にかけて、菊池寛が芥川龍之介の助力も得ながら興文社、文藝春秋社から発行した小學生全集全88巻のうち、昭和3年に発行された第61巻「児童物理化学物語」には、友田宜孝著「化学の眼鏡」が収録されている¹⁷⁾。ここではお父様（忠雄さんの父）が「化学の眼鏡」という世にも珍しい眼鏡を持っていて、忠雄さんにミクロの原子・分子・電子の世界を見せてくれる。小さすぎて見えない原子・分子・電子の世界は物質の世界、化学の世界の本質である。



化学の眼鏡(昭和3年)

化学のめがね(昭和40年)



図る来出の子分の水でし突衝と子分の素水と子分の素素

子供たちは五感で実感できるものは好きになれるが、抽象的で体感できない世界に興味を持つことは難しい。しかし子供たちは古すぎて現在はいないはずの恐竜が好きになり、大きすぎて体感できないはずの宇宙や天文の世界が大好きである。博物館や図鑑などでその世界を見て、夢とロマンを感じている。

化学の世界は小さすぎる世界で、抽象的かつ難しいと感じる量子化学の世界であるからこそ、昭和3年の「化学の眼鏡」のように、抽象的ではない具体的な世界として子供たちに原子・分子・電子の世界を見せる努力が必要である。まずは見て触れる元素を好きになり、理科実験で物質に興味を抱き、電子が主役の化学の世界に嵌ることこそ、行き着くところ化学系博士人材輩出につながるのではないだろうか。

- 1) <https://www.cas.org/cas-data/cas-registry> (2025/2/27アクセス)
- 2) マーチン トロウ著、天野郁夫・喜多村和之訳：高学歴社会の大学—エリートからマスへ、東京大学出版会(1976)。
- 3) D. リースマン著、喜多村和之・江原武一・福島咲江・塩崎千枝子・玉岡賀津雄訳：高等教育論—学生消費者主義時代の大学、玉川大学出版部(1986)。
- 4) 松下佳代、学生消費者主義と大学授業研究：学習活動の分析を通して、京都大学高等教育研究, 8, pp 19-38(2002)。
- 5) 坂根弦太、初年次教育における学生の原体験不足を補う理科教材の整備—聞く・読むだけではなく、見て触って実感する基礎概念—、岡山理科大学教育実践研究, 1, 53-72(2017)。 <https://ous.repo.nii.ac.jp/records/2225>
- 6) 坂根弦太の出張講義 <https://www.gsakane.com/visiting.html>
- 7) 元素、原子、電子の児童、生徒への啓発活動, https://www.jucst.org/media/2019award_abstract.pdf
- 8) 坂根弦太、元素集め、理科の探検, 2013別冊8月号, 54-56, 文理 2013年。
- 9) 坂根弦太、世界の周期表, オモシロ周期表, ケミストを魅了した元素と周期表—よりマニアックな楽しみ方—, 月刊化学(別冊化学), 化学同人 2013年。
- 10) 坂根弦太、こんなに入手可能な周期表～化学の世界のガイドマップを集めよう～, 理科の探検, 2(9), 48-40 星の環会 2008年。
- 11) 青木宏之、高原周一、坂根弦太、岡山理科大学基盤教育センター 化学基礎実験・基盤化学実験 第12版 2024年。
- 12) https://www.mext.go.jp/content/20211102-mxt_kyoiku02-100002620_06.pdf
- 13) 坂根弦太、森義裕、教育用分子軌道計算システムeduDVの教育現場への活用, 岡山理科大学情報処理センター研究報告, 41/42, 9-28 (2022)。 <https://ous.repo.nii.ac.jp/records/2997>
- 14) K. Momma and F. Izumi, VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data, J. Appl. Crystallogr., 44, 1272-1276(2011)。 <https://doi.org/10.1107/S0021889811038970>
- 15) 坂根弦太、カリウム原子でM殻が最大収容数の電子で満たされる前にN殻に電子が収容されるのはなぜなのか—高等学校理科「化学」でDV-X α 法を使うためのeduDVの改訂—, DV-X α 研究協会会報(Bulletin of the Society for Discrete Variational X α) 37(1&2), 31-38(2024)。 <https://www.dvxa.org/>
- 16) DV-X α 法で計算し、VESTAで描いた原子軌道(s, p, d, f軌道) <https://www.gsakane.com/A0/>
DV-X α 法で計算し、VESTAで描いた原子軌道(g軌道) <https://www.gsakane.com/5g/>
DV-X α 法で計算し、VESTAで描いた原子軌道(h軌道) <https://www.gsakane.com/6h/>
DV-X α 法で計算し、VESTAで描いた原子軌道(i軌道) <https://www.gsakane.com/7i/>
- 17) 友田宜孝、化学の眼鏡, 小學生全集第61巻児童物理化学物語, 115-142, 興文社・文藝春秋社 1928年。(修正再録：友田宜孝, 化学のめがね, 板倉聖宣, 奥田教久, 小原秀雄編, 少年少女科学名著全集第6巻, 7-113, 国士社 1965年。)