

ヨウ素の実験材料としての魅力

肆矢 浩一
Koichi YOTSUYA

1. はじめに

ヨウ素はうがい薬やヨードチンキに含まれ、医薬品として我々の生活に役立っている。人間の体内にも甲状腺からチロキシンというホルモンが分泌され、このホルモンにもヨウ素が含まれている。原発事故では、甲状腺に放射性ヨウ素が蓄積する恐れがあり、その予防のためにヨウ化カリウムの錠剤が子供達に配られたことはまだ記憶に新しい。

ところで、私がヨウ素に関心を持つきっかけとなった実験がある。平成5年に「青少年のための科学の祭典」で、「昆布からヨウ素を取り出す」という実験の手伝いをしたときである¹⁾。この祭典は、小中学生に科学に興味を持ってもらうという趣旨で、毎年行われている全国規模のイベントである。実験では、前もって焼いておいた昆布の粉末に、酸化剤を加える操作を行う。このとき、紫色の煙が立ち上り、黒紫色の結晶が得られた。小学生だけでなく、この実験を初めて体験した私も感動した1人であった。これがきっかけとなり、以後ヨウ素に魅力を感じ、ヨウ素に関係する実験開発に取り組むことになった。今までに、幾つかの生徒実験ならびに演示実験を、研究会などで発表してきた。本稿では、ヨウ素に関する話題ならびに実験を紹介したい。

2. ヨウ素の生産

2.1 日本におけるヨウ素の生産

工業原料のほとんどを輸入に頼っている日本において、ヨウ素は自給している数少ない物質である。国内での産出の8割は千葉県であり、残り2割は新潟県と宮崎県となっている。世界においては、最大のヨウ素生産国はチリで、世界の6割を占めている。その中で、日本は世界第2位であり、世界で3割の生産を誇っている。日本がヨウ素の主要な生産国で、海外にヨウ素を輸出していることは意外と知られていない。

平成10年に、ヨウ素の高度利用を目指し「ヨウ素利用研究会」が発足した。さらに、平成19年には「ヨウ素学会」に名称を変え、この学会はヨウ素に関する環境、エネルギー、生命の分野に関して幅広く活動している。なお、ヨウ素の生産が千葉県に集中していることもあ

り、学会事務局は発足以来、千葉大学内に置かれている。写真1はヨウ素学会の学会誌である。

平成25年3月に、ヨウ素を生産する日本天然ガス株式会社の千葉工場を見学する機会があった(写真2)。所在地は千葉県長生郡白子町であり、交通不便な場所にある。工場では外観を見学するだけで、残念ながらヨウ素を取り出す様子は見るができなかった。たとえ見ることができたとしても、ほとんどの化学工場内の撮影は禁止となっているのが通例である。工場では、技術担当者から「かん水」からヨウ素を取り出す方法を、詳しく説明してもらうことができた。その内容は、高校生でも理解できるレベルであり、直接授業に活かせるものであった。

ヨウ素の原料となるのは、天然ガスとともに汲み上げられる地下水で、かん水と呼ばれている。かん水は、天然ガスとともに地下500～2000mから汲み上げられ、このかん水中にヨウ素の元となるヨウ化物イオンが100ppm含まれ、その量は海水の2000倍と言われている(写真3)。この会社の社名がなぜ「日本天然ガス」であるかは、かん水が天然ガスとともに汲み上げられることに関係する。

製造工程は、かん水中のヨウ素分を抽出・濃縮して濃厚液とする前半工程と、濃厚液中のヨウ素を結晶として取り出し、精製して製品とする後半工程からなる。国内のヨウ素製造方法は、かん水からのヨウ素分の抽出の仕方によって二つに分類される。一つは、ヨウ素の気化しやすい性質を利用して、気化させたヨウ素を吸収液に取り込んで抽出する「ブローアウト法」である。もう一つは、イオン交換という原理を利用して、樹脂にヨウ素分を吸着させ抽出する方法である。両方とも、高校でも扱う内容であり、今後これらを教育現場で生かすために教材化できればと考えている。



写真1 ヨウ素学会の学会誌



写真2 日本天然ガス株式会社



写真3 かん水、ヨウ素吸着樹脂、ヨウ素、ヨウ化カリウム
(提供：日本天然ガス株式会社)

2.2 昆布を使った実験

ヨウ素を含む食品には、昆布、ひじき、わかめ、のり、寒天、トコロテン、もずくなどが知られている。とくに、ヨウ素といえば昆布が連想され、昆布はヨウ素の代名詞となっている食品である。食品から化学成分を取り出す実験には、「茶葉からカフェインを取り出す」や「クスノキからショウノウを取り出す」などがある。その中でもヨウ素は昆布から比較的容易に取り出すことができる。下記に、実験「昆布に含まれるヨウ素を確認する」について簡単な解説と実験写真を示した²⁾。

【実験1】昆布に含まれるヨウ素を確認する

細かく切った昆布を蒸発皿に入れ、強熱して灰にする。ろ過によって、灰の成分を蒸留水に溶かし出す。このろ液に硫酸酸性にした過酸化水素水を加えることによって、ろ液中にヨウ素を析出させる。その溶液にデンプン溶液を加え、青紫色に呈色することによりヨウ素の存在を確認する（写真4）。



写真4 昆布に含まれるヨウ素を確認する。

3. ヨウ素の性質と用途

3.1 ヨウ素の性質

ヨウ素は常温で黒紫色の固体であり、加熱すると昇華する。昇華とは、固体が液体とならずに直接気体となる変化であり、ナフタレンなどの防虫剤やドライアイスに見られる現象である。ヨウ素の単体は分子結晶であり、ヨウ素分子が多数集まって結晶ができています。その構成要素となる分子は、 I_2 と表される。教科書では分子結晶の物質例として必ず記載されるものである。

ヨウ素の溶媒への溶解性は、無極性のため水に溶けにくい。これを溶かすためには、エタノールまたはヘキサンなど無極性の溶媒を使う必要がある。また、ヨウ素はヨウ化カリウム水溶液に溶ける性質を持つ。ヨウ素デンプン反応で用いられるヨウ素液は、このヨウ素ヨウ化カリウム水溶液のことである。

ヨウ素はいろいろな色を見せてくれる物質である。固体のヨウ素は黒紫色、ヨウ素の気体は赤紫色である。ヨウ素が陰イオンになると無色になる。さらに、ヨウ素を有機溶媒に溶かすと、ヘキサンでは紫色、ジエチルエーテルでは褐色、ベンゼンでは赤色となる（写真5）。また、デンプン水溶液とヨウ素の反応は、青色を呈する。このようにヨウ素を使った実験では色の変化が多様であり、私たちの目を楽しませてくれる。

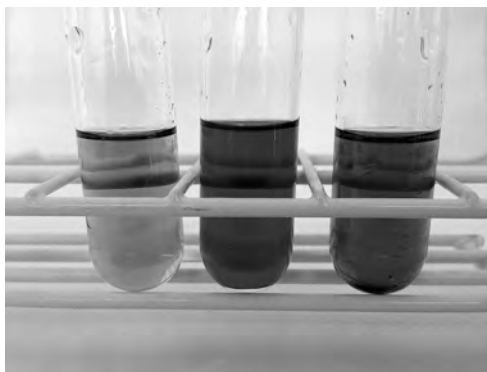


写真5 ヨウ素溶液

周期表の17族元素にはフッ素、塩素、臭素、ヨウ素があり、ハロゲンと呼ばれている。ハロゲンは、強さは異なるがそれぞれ酸化作用をもっている。とくに、塩素には強い酸化作用があり、プールの水や水道水の殺菌に使われていることはよく知られている。それに対して、ヨウ素は、ハロゲンの中で最も酸化作用の弱い分子である。この弱い酸化作用が、うがい薬として人体に適度な殺菌効果をもたらし、医薬品として私たちの健康に役立っている。

3.2 医薬品としての用途

ヨウ素は水に溶けにくいので、エタノールやヨウ化カリウム水溶液に溶かして可溶化する。これがヨードチンキであり、消毒薬としては刺激が強い。これに対して、刺激が少ない消毒薬として、ポピドンヨードが開発された。ヨウ素を含むうがい薬はこのポピドンヨードを含む（写真6）。これは高分子であるポリビニルピロリドンとヨウ素が結合したヨウ素の複合体である。ヨウ素は水に溶けにくい物質であるが、ポピドンヨードは、どんな割合でも容易に水に溶かすことができる化合物である。ヨウ素を含むうがい薬は医薬品だけでなく、化学の実験材料としても利用価値が高い。高校化学における酸化還元単元では、身近な物質としてうがい薬を酸化剤に使うことができる。酸化剤と還元剤で起こる反応は電子のやり取りであり、生徒にとって化学の中で最も理解しにくい分野である。生徒が教科化学に対して食わず嫌いにならないためにも、まず酸化還元反応に興味を持ってもらうことが先決である。生徒が知っている身近な物質を実験に使うことは、化学を理解させるために教育効果が高い方法と思われる。



写真6 ヨウ素を含む医薬品

【実験2, うがい薬とビタミンCの反応】³⁾

身近な物質を使った酸化還元の実験を紹介したい。準備するものは、ヨウ素を含むうがい薬、過酸化水素を含むオキシドール、ビタミンCの錠剤である。ここで、ヨウ素はビタミンCに対して酸化剤として働く。この実験は薬品を使用しないので、普通教室でも演示できる。実験方法は、ビーカーにうがい薬を深さ約5mm入れ、その中央にビタミンCの錠剤を1個落とす。数分すると、錠剤の周りがビタミンCの働きで、しだいに透明になっていくことがわかる（写真7）。さらに、オキシドールを加えると元のうがい薬の色に戻すことができる。



写真7 うがい薬とビタミンC

【実験3, うがい薬による二酸化硫黄の検出】³⁾

毛糸はタンパク質からなり、成分元素として硫黄を含んでいる。これを燃焼すると二酸化硫黄が発生する。二酸化硫黄は反応する相手によって酸化剤にも還元剤にもなる物質である。ヨウ素が相手である場合は、二酸化硫黄は還元剤として働く。この反応では、ヨウ素は二酸化硫黄と反応してヨウ化物イオンとなり、水溶液が褐色から無色となる。

実験方法は、集気瓶に水10mL、うがい薬を2～3滴加えて攪拌する。さらにデンプン溶液を加えて青色にしておく。これにより、かなり濃度の薄いヨウ素水溶液をつくることができる。毛糸を銅線の先につけ、火を付ける。すばやく集気瓶の中に入れ、毛糸から出る煙が集気瓶から出ないようにガラス板でふたをする。集気瓶をよく振り二酸化硫黄をうがい薬に溶かすと、青色にしたうがい薬の色が消える（写真8）。



写真8 うがい薬と二酸化硫黄

3.3 液晶ディスプレイとヨウ素

ヨウ素は液晶ディスプレイに使われる偏光フィルムを作るために欠かせないものである。ヨウ素から三ヨウ化物イオン I_3^- をつくり、これが偏光フィルム製造に必要となる。偏光フィルムは自然光を透過して偏光をつくるものである。偏光を簡単に説明すると、自然光は 360° の方向に振動しながら進むが、偏光フィルムにこの光を通すと、光の振動を一定の方向に揃えることができる。この偏光フィルムを作るには、ポ

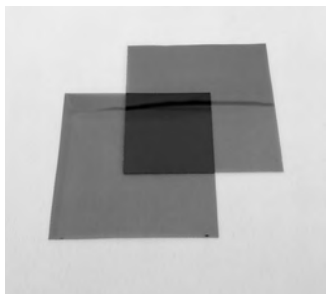


写真9 偏光フィルム

リビニルアルコールに三ヨウ化物イオンを含ませる。このとき、ヨウ素デンプン反応と同じように黒色を呈する。これを特定の方向に延伸することで三ヨウ化物イオンの向きが長軸方向にそろい、偏光フィルムとなる。これは偏光サングラスに用いられていたが、最近ではディスプレイや携帯電話の液晶画面に広く利用されている。写真9は、偏光フィルムを2枚重ねている。一方のフィルムを回転させると、光が遮られ黒くなることがわかる。

3.4 高校化学の教科書での取り扱い

ヨウ素は、理論化学から無機化学、さらに有機化学の分野にわたって幅広く関係している。とくに、酸化還元に関係する内容でよく扱われ、発展的な学習として定量分析のヨウ素滴定が行われている。状態変化としての「昇華」では、ドライアイスと並んでヨウ素もその一例として扱われ、実験写真がよく掲載されている。天然高分子ではデンプンの分子構造とともに、ヨウ素デンプン反応について発色の仕組みの解説がある。ヨウ素は無極性の物質例としてもよく取り上げられ、溶媒抽出の説明に使われている。化学反応の速さと化学平衡では、反応が比較的簡単に説明できる水素とヨウ素の反応が取り上げられている。以上の通り、ヨウ素は高校化学では幅広くいろいろな単元に関係する。その項目を下記に列挙した。

- ・ヨウ素と砂の混合物から、ヨウ素を取り出す昇華法
- ・無極性分子、分子結晶の例
- ・ヨウ素の水への溶解性、ヘキサンへの溶解性
- ・水素とヨウ素からヨウ化水素が生成する反応におけるエネルギー変化と反応速度
- ・水素、ヨウ素、ヨウ化水素の化学平衡
- ・ヨウ素デンプン反応のしくみ
- ・酸化剤検出用のヨウ化カリウムデンプン紙
- ・硝酸銀水溶液とヨウ化カリウムとの反応で生じるヨウ化銀の黄色沈殿
- ・有機化合物の構造決定に利用されるヨードホルム反応
- ・ヨウ素をヨウ化カリウム水溶液に溶かしてできるヨウ素ヨウ化カリウム水溶液
- ・油脂の不飽和度を評価するためのヨウ素価
- ・ヨウ素滴定

4. 時計反応

4.1 時計反応とは

ヨウ素酸カリウム水溶液と亜硫酸ナトリウム水溶液を混合すると、しばらくしてから突然に無色透明な液が青色になる。この反応は、反応開始から数分が経過して、最終生成物の呈色反応が起こるので、「時計反応」と呼ばれている。発色までの時間は、溶液の濃度や温度によって決まる。この反応は振動反応とともに興味深い実験として昔からよく知られているものである。30年前の化学の教科書では、反応速度の実験として扱われたことがある⁴⁾。今では若い先

生も知らない実験となっていることは残念である。生徒実験や公開講座などでこの実験を行うと、驚きとともに注目を集めることができ、演示実験としての教育効果が高い。なお、反応のしくみは複雑であり、関心のある方は参考文献を参照していただきたい⁵⁾。

4.2 身近な物質を使った時計反応

身近な物質を使った時計反応を行うに当たっては、うがい薬、オキシドール、ビタミンC入りの清涼飲料水を選んだ。薬品を使った実験と比べて実験結果が明瞭ではないが、身近な物質を希釈することなく、そのままの濃度で実験することができることが特徴である。また、一般に薬品の酸化剤、還元剤などは、重金属が含まれることがあり、廃液にも注意しなければならないが、この実験ではその心配は不要である。

【実験4、身近な物質を使った時計反応】^{6) 7)}

実験は、まずうがい薬を試験管に1mLとる。さらに、その中にビタミンC入りの清涼飲料水を3mLとデンブ水溶液1mLを加え、透明な水溶液とする。最後に、オキシドールを1mL加えることにより、水溶液が青色を呈するまでの時間を測定する。うがい薬1mLに加える各水溶液の体積をえることによって、発色するまでの時間を調整することができる。図3には、加えるオキシドールの体積と発色するまでの時間をグラフで示している。同様に、溶液の温度を変化させると、発色する時間も変わる。一般に、反応物の濃度を大きくするか、または温度を高くすると反応速度が速くなり、発色する時間が短くなる。

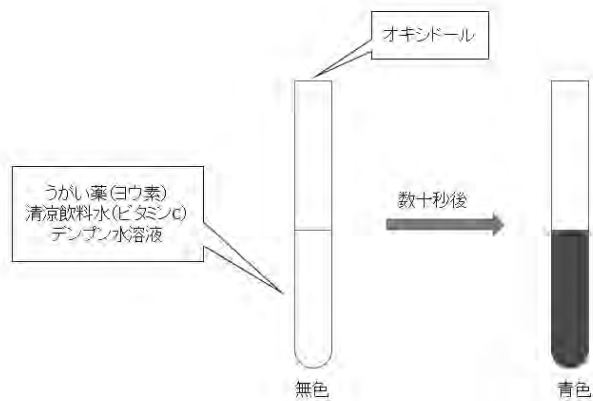


図2 時計反応の概要

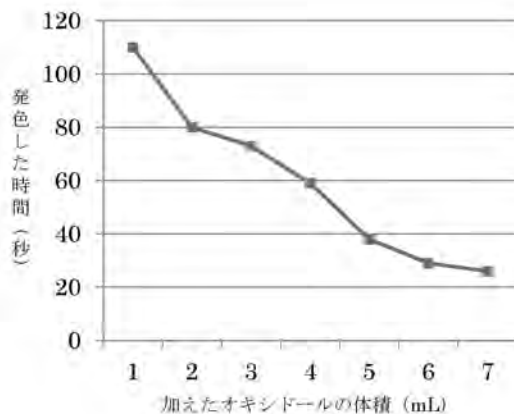


図3 加えたオキシドールの体積と発色した時間の関係

5. ヨウ素デンプン反応

5.1 ヨウ素デンプン反応の仕組み

小学校から馴染みのある実験として、ヨウ素デンプン反応はよく知られている。高校でも発色の仕組みを、分子レベルで説明する内容が教科書で取り上げられている。「ヨウ素デンプン反応がなぜ青色になるのか?」と「植物の葉はなぜ緑色になるのか?」は、いずれもある波長の光を吸収することに起因し、光と物質の相互作用から発色のしくみを説明することができる。現行の教科書では、デンプンのらせん構造にヨウ素分子が入り込み、特定の波長の光を吸収することによって説明されている(図4)。ヨウ素デンプン反応では試薬としてヨウ素ヨウ化カリウム液を使用する。この溶液中には水に溶ける三ヨウ化物イオンが多く存在するが、ヨウ素分子はかなり少ない。このことからすると、デンプンのらせん構造に入るのは、ヨウ素分子より三ヨウ化物イオンではないかと考えられる。しかし、教科書では昔からヨウ素分子が入り込む記述となっている。多くの専門書でもその記述は同じである。ヨウ素デンプン反応について雑誌に解説する機会があり、始めは三ヨウ化物イオンを使って説明を試みたが、編集の段階で教科書の記載に合わせた方が良いという方針で書き直した経験がある。

昨年、この問題を長年研究されている研究者を知ることができ、偶然にも「なぜヨウ素デンプン反応は青色か?」の講演を聞くことができた。その論文も読んだが、説明には分光学や量子論が取り入れられ、浅学の私には内容のほとんどを理解できずに終わった。しかし、多くの文献にある説明とは異なり、ヨウ素デンプン反応の発色の仕組みは三ヨウ化物イオンとヨウ化物イオンがデンプンとの相互作用によって起こるとの結論であった。長年抱いていた疑問の少しが解消された気分となった。詳細を知りたい方は、化学と教育誌の2015年5月号を参照されたい⁸⁾。今後、教科書の記述が見直されることを期待したい。

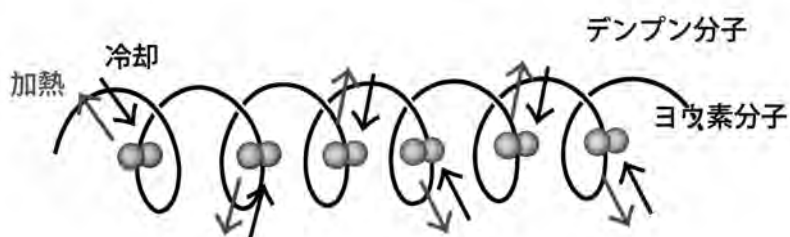


図4 ヨウ素デンプン反応のしくみ⁹⁾

5.2 加熱冷却によるヨウ素デンプン反応の変化

ヨウ素デンプン反応の発色の仕組みについてはすでに述べた。ヨウ素デンプン反応によって発色した状態を加熱するとどうなるであろうか。温度が上昇すると分子の運動が激しくなり、デンプンもヨウ素もそれなりの分子運動をすることになる。このことを想像すると、ヨウ素の動きとともにデンプンのらせん構造が崩れ、デンプン分子内にヨウ素が安定して存在できないことになる。実際に実験してみると、予想通り青紫色が消えていく。目で見て観察できること

を、分子レベルで説明して理解が得られる事例はそれほど多くない。この実験は、小・中学生にもイメージできる内容ではないだろうか。この実験を小・中学生に演示する機会があり、上記の説明をしたところ、多くの生徒が興味を示してくれた。

【実験5, ヨウ素デンプン反応】⁹⁾

デンプン水溶液をつくり、試験管に5mL入れる。この試験管にヨウ素ヨウ化カリウム溶液を数滴加え、青紫色に呈するヨウ素デンプン反応を確認する。さらに、60℃の湯を用意し、青紫色に呈色した試験管をいれ、しばらく放置する。試験管中の水溶液の青紫色が消えるのを確認した後に、試験管を冷水に入れ再び放置する。しばらくすると元の青紫色に戻っていく。この変化は何度も繰り返すことができる。

6. おわりに

化学を専門にする私にとって、ヨウ素という元素に特別な思い入れがある。約40年間の教員生活を通してヨウ素に親しみをもって接してきた。本校の紀要にも平成25年に「簡易的な酸化還元滴定」のテーマで、ヨウ素に関する内容を執筆したことがある。前述した「ヨウ素利用研究会」に入会し、学会誌を購読した時期もあった。最近では、平成21年から日本化学会発行の「化学と教育」誌の企画編集を担当することになり、数年前、特集記事のテーマに「ヨウ素の化学」を提案したことがある。残念ながら、そのときは採択されず、見送られることになった。しかし、幸いにもその後特集記事の見直しがあり、平成27年の5月号に「ヨウ素の化学」を掲載する運びとなった。この企画の担当者として、ヨウ素に関係する最近の話題、ヨウ素利用の現状などを知ってもらおうべく、力を注ぐ機会を得ることができた。本稿は、その内容を踏まえて書かせていただいた。本稿を通して、身近な物質の代表格であるヨウ素が、我々の生活や化学の実験教材にいかに関わっているかを、少しでも理解していただければ幸いである。

【参考文献】

- 1) 原久雄, 梅野正, 肆矢浩一「青少年のための科学の祭典 実験解説集」1993年, p160
- 2) 増田達男, 肆矢浩一, 中込真, 米山裕「フォトサイエンス化学図録」数研出版, 2011年
- 3) 肆矢浩一, 化学と教育, 2013, 61, p236
- 4) 長倉三郎, 渡辺啓「改訂化学」東京書籍, 昭和63年, p276
- 5) シャクハシリ「教師のための化学実験 振動反応と時計反応」丸善, 1998, p123
- 6) 肆矢浩一「平成12年度全国理科教育大会愛知大会 研究発表論文集」第22巻, p108
- 7) 肆矢浩一「青少年のための科学の祭典 実験解説集」2000年, p37
- 8) 矢島博文, 化学と教育, 2015, 63
- 9) 肆矢浩一, 化学だいきクラブニュースレター, 2013年1号, p4