

水を多面的に理解し，総合的な見方や科学的に探究する能力を育む実験教材の工夫

越坂 直広

水環境や化学の基礎について，主体的に探究し興味や問題意識をもって効果的にアプローチできる観察，実験の方法について検討した。

[キーワード] 高等学校理科 水環境 高度浄水処理 環境教育

はじめに

今日，水環境においては，自然の自浄作用では追いつけないほどの急激な水の汚濁が進んでいると指摘されている。このような中で，水が汚染されていくしくみや，自然の生態系と物質の循環及びエネルギーの流れを知り，水も他の資源同様に有限の資源であるとの認識を高めることが課題である。そのためには，水の保全や再利用について検討し，水を軸にした環境問題について考察を加え，対策を練り，そして行動に移す態度を育むこと，資源やものを循環させ，自然と共生する合理的な生活，活力ある持続可能な社会を模索する力を育むことが大切である。

ここでは，水の調べ方を把握し，pH，コロイド，凝析，吸着，イオン交換，酸化還元，キレート等に関係する化学についての理解を図ることのできる，わかりやすく効果的で，科学的に思考できる教材を検討した。また，この教材は主に高等学校化学の「物質の種類と性質」及び「物質の変化」，化学の「課題研究」，総合的な学習の時間の「環境などの横断的・総合的な課題についての学習活動」，高校理科総合Aの「科学技術の進歩と人間生活」等広い場面での活用が考えられる。

- 1 高度浄水処理モデルを用いた水環境を簡単・効果的に理解できる実験教材
身の周りの材料を活用して浄水処理場と同じ

原理で濁水を飲料水に換える。(生物)活性炭吸着処理・オゾン処理などによりカビ臭物質(2-メチル-イソボルネオールなど)やアンモニア性窒素をも分解し，陰イオン界面活性剤，トリハロメタン生成能を減少させる高度浄水処理を含めた浄水システムの化学的側面からの理解を促進する教材化，併せてグリーンケミストリー概念を生かした教材化を図った。

準備

濁水，ガラス棒，ろうと，ろ紙，ろうと台，ビーカー(300 mL)，凝集剤(カリウムミョウバン，焼きミョウバン，硫酸アルミニウム(硫酸バンド)，ポリ塩化アルミニウム(PAC)など)，アルカリ剤(石灰)，活性炭，殺菌剤(次亜塩素酸ナトリウム，オゾンなど)，簡易pH計

方法

- (1) 濁水のpHを測定する。
- (2) 4つのビーカーA～Dそれぞれに200 mLの濁水を採り，凝集剤としてAにはカリウムミョウバン，Bには焼きミョウバン，Cには硫酸アルミニウム，Dにはポリ塩化アルミニウムをそれぞれ1 gずつ入れ，その後，ガラス棒で1～2分程度攪拌する(図1)。
- (3) 方法(2)の水を5分放置し観察・比較した後，ろ過し，ろ液のpHを測定する。
- (4) 方法(3)のろ液に1 gのアルカリ剤(石灰など)を入れ，その後，ガラス棒で1～2

分程度撹拌する。

- (5) 方法(4)の水を5分放置し観察，比較した後，ろ過し，ろ液のpHを測定する。
- (6) 方法(5)のろ液に1gの活性炭を入れ，その後，ガラス棒で1～2分程度撹拌する。
- (7) 方法(6)の水を5分放置し観察，比較した後，ろ過する。
- (8) 方法(7)のろ液に次亜塩素酸ナトリウムを滴下して殺菌する。このとき，飲料水においての実効有効塩素濃度（約0.8ppm）となるように原液を希釈する（例えば原液が12%であれば140,000倍に希釈）。また，他の方法として簡易装置から発生させたオゾンによる殺菌も行う。

考 察

- (1) 凝集剤による処理では，凝析，コロイド（帯電についても含む）の化学と関連させて考察させる。



図1 種々の凝集剤の比較

- (2) アルカリ剤（例えば石灰）の処理前後において，pH測定やキレート滴定により硬度のデータをとった後，pH調整，コロイドの性質とフロックの生成，水の硬度，キレートの化学と関連させて考察させる。

キレート滴定に必要なもの～EDTA（エチレンジアミン四酢酸二ナトリウム），EBT指示薬（エリオクロームブラックT），塩酸ヒドロキシルアンモニウム，エタノール，アンモニア緩衝溶液（塩化アンモニウムとアンモニア水を使用）

- (3) 活性炭においては浄水専用のものや100円

ショップで売られている安価なものなど複数のものを使用し吸着能力を比較しその結果を考察させるとよい。活性炭による処理では，吸着の化学（吸着の原理や活性炭がフミン質や水に異臭味をつける有機物を吸着することや，活性炭の表面積の大きさについても具体的にふれる）と関連させて考察させる。

- (4) 生物膜ろ過（ろ材：アンスラサイト）やオゾン耐性膜ろ過などの新しいろ過方法についても発展させる。また，ろ材について，浄水場で用いられている砂ろ過，及び中空糸膜や逆浸透膜等のポリアミド系または酢酸セルロース系の合成樹脂膜による浄水方法・及び膜の種類による分離手法とその原理及び除去対象についても（浸透圧・海水の淡水化とも結びつけて）考察させる（表1）¹⁾。
- (5) 殺菌処理では，化学的な側面からの理解を促す。特にオゾンについては，特有のにおいや強い酸化分解力を実感させるなどオゾンの基本的な性質（及び確認方法：KIデンプン水溶液などの利用）についても結びつける。
- (6) 高度浄水処理が求められるようになった背景について浄水の歴史を含めて考察させる。

表1 浄水膜の種類と性能

名 称 ・ 孔 径	除 去 対 象
M F 膜 （精密ろ過膜） 20nm～200nm	懸濁物質，細菌類，藻類， 原虫類
U F 膜 （限外ろ過膜） 5nm～20nm	分子量1,000～300,000Daの 高分子物質，懸濁物質，細菌 類，藻類，ウイルス，原虫 類，コロイド，蛋白，色度 （高分子）
N F 膜 （ナノろ過膜） 0.5nm～5nm	分子量100～5,000Daの低分 子物質，フルボ酸，トリハロ 前駆物質，カビ臭，洗剤，カ ルシウムイオン，マグネシウ ムイオン
R O 膜 （逆浸透膜） 0.2nm～0.8nm	分子量100Da程度のイオン， 塩化物イオン，ナトリウム イオンなどの溶解塩類

- (7) 高等学校化学において、グリーンケミストリー（GSC）の概念を生かした教材の開発や学校教育のカリキュラムの中にどのように組み込むかが課題となっているが、微生物や吸着剤、分離機能性膜などを活用した高度浄水処理と関連させてこのGSCの概念についても考察させる。

参 考

- (1) 濁水は自然のものや粘土を水に溶かしたものの双方を使用し比較するとよい。
- (2) 浄水のプロセスは、濁水→凝集剤・アルカリ剤添加→（ろ過）→活性炭添加→（ろ過）→殺菌の流れである。
- (3) ミョウバンを凝集剤として用いた場合、ろ液のpHは4前後となった。これにアルカリ剤を加えてpH5～8とするとフロック（水に凝集剤を入れた時の凝集体）が生じやすい状態となる（この実験ではpHは6前後になる）。
- (4) 実際に浄水場で使用されている凝集剤は硫酸アルミニウム（硫酸バンド）やポリ塩化アルミニウム（PAC：最も広く使用されている）である。PACを式で表してみると、 $[Al_2(OH)_nCl_{n-6-n}]_m$ （ $1 \leq n \leq 5, m \leq 10$ ）となる。PACは凝集pH範囲が広くフロックの形成も速い優れた凝集剤である。またPACは塩基性塩なのでアルカリ剤の消費量が少ないのも利点である。
- (5) アルカリ剤として石灰のほかに水酸化ナトリウム、水酸化カルシウム等を用いてみるとよい。石灰を用いた場合はキレート滴定で硬度の上昇を確かめるとよい。上江別浄水場では、活性炭を用いて、総トリハロメタンを従前の数値の16%まで低下させるとともに、アルカリ剤には、従来使用していた水酸化ナトリウムから消石灰に変換した結果、水の硬度が上昇（約20mg/ℓ）し、ランゲリア指数についても-2.2から-1.0に改善し、カルシウム分の増加で水の味が良くなったと市民から評価されている。（ランゲリア指数：水道水の腐食性を示す判定指標）

- (6) 殺菌においては、次亜塩素酸ナトリウム、オゾンを用いる方法以外にも銀イオンによる殺菌も教材化した（銀電極を用いた電気分解を活用）。

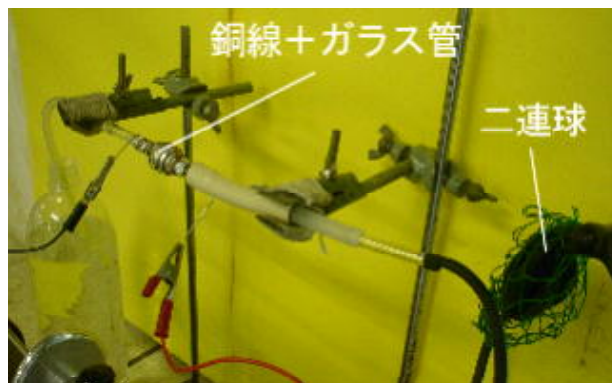


図2 簡易オゾン発生器による殺菌

オゾンは、特にオゾン発生器等を使用しなくてもガラス管（内径1cm長さ50cm程度）に銅線を1cmに3巻きくらいの割合で巻きつけた簡易的なものを自作し、これに誘電コイルで高電圧をかけ空気を送り込むと得られる（図2）。

- (7) 殺菌効果は寒天培地（市販されているシート状培地でも可）を用いて確かめる。
- (8) 石灰・ミョウバン・活性炭などはホームセンターなどで入手できる（図3）。



図3 身近な材料の活用

- 2 残留塩素と除去について理解させる教材
DPD試薬で残留塩素を検出して、除去方法

(煮沸・攪拌・放置など)を組合せ、水の汚染と殺菌・残留塩素の長短所・化学的除去方法及びトリハロメタンができる過程と問題点についても考察できる教材化を図った。

準 備

試験管，D P D 試薬（N，N-ジエチル-P-フェニレンジアミン硫酸塩・無水硫酸ナトリウム），ビタミンC（タブレット状のビタミンC入りの菓子をを用いてもよい）

方 法

- (1) 水道水を試験管に5分の1ほど取り，D P D 試薬を耳かき1杯程度入れ，観察する。
- (2) 煮沸水，浄水器を通した水，ビタミンCを入れた水についても方法(1)の操作を行う。

考 察

- (1) 水道水やプールの水を塩素処理する理由，及び水と塩素との反応について考察させる。
- (2) 水道水の中の有機物と塩素からトリハロメタンが生成する過程とその問題点について考察させる。
- (3) 方法(2)のビタミンCの働きと身近な活用例について考察させる。

参 考

- (1) D P D 試薬は酸化発色試薬で残留塩素により酸化され溶液中の残留塩素が多いほどピンク色の発色が濃くなる試薬である。浄水器の交換時期を判断するものとして，ホームセンターなどでも安価で販売されている。ここでは，N，N-ジエチル-P-フェニレンジアミン硫酸塩1gと無水硫酸ナトリウム24gを混合させて調整したものを使用した。

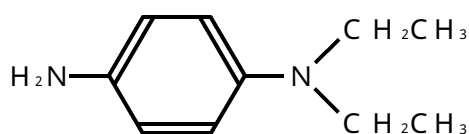


図4 DPDの構造

- (2) 残留塩素を調べる試薬として黄色に発色するオルトリジンが用いられてきたが毒性が

強いことから現在使用が控えられている。

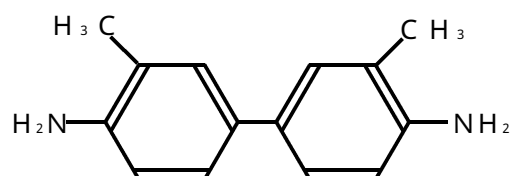


図5 オルトリジンの構造

- (3) 残留塩素については，歴史上果たしてきた役割（長所）と問題点（短所）の2つの側面からの教材化の視点が重要である。

3 水の硬度と洗浄効果を確認する教材

E B T 試薬（キレート滴定）により水の硬度の教材化を図った。併せて純セッケンを用い各種の水の洗浄効果を比較した。硬水・軟水の化学的な成分と簡単な区別方法，水の軟水化の方策等を理解し，生活や環境への影響，イオン交換樹脂のしくみを考察できる教材化を図った。

準 備

試験管，ミネラルウォーター（エピアンなど），イオン交換樹脂（アンバーライト I R - 120 B など），カラム（活栓付きの長さ30cm×直径3cmくらいのもの），純セッケン，ペットボトル（500 ㍈；4本），E B T 試薬（少量の重曹を含む）

方 法

- (1) ミネラルウォーター，水道水，純水をそれぞれ試験管に5分の1ほど取り，E B T 試薬を耳かき1杯程度入れ，観察する。
- (2) イオン交換樹脂をカラムに詰め，カラムにミネラルウォーターを通す。その後，カラムを通った水に方法(1)と同様の操作をする。
- (3) ミネラルウォーター，水道水，純水，方法(2)の水をペットボトルに入れ，その中に純セッケンひとかけらを入れ，激しく振る。

考 察

- (1) 硬水，軟水の化学的な成分の違いとその区別方法を考察させる。発展的にはキレート滴

定によって各種の水の硬度を求める。

- (2) 硬水，軟水の人体（神経や酵素の働きについても関連させる）や，生活への影響について考察させる。
- (3) 硬水を軟水に換えるイオン交換樹脂のしくみについて考察させる。

参 考

- (1) E B T 試薬は硬水であれば赤紫色，軟水であれば青色を示す。
- (2) 一般的には，硬度100mg/ℓ未満を軟水，硬度100～300mg/ℓ未満を中硬水，硬度300mg/ℓ以上を硬水と大別している。日本の水の硬度は70～80程度である。ヨーロッパ（アルプス）の水は地質の影響（石灰質）の影響で硬度が高く，例えばエピアン：293，ヴィッテル：309，コントレックス：1559となっている。

4 水デザイン器（浄水機能を含む）を用いた科学的に思考し総合的な見方や科学的に探究する能力を育む実験教材

身の周りの材料を活用して，水道水，ミネラルウォーター，濁水等を開始とし，キレート滴定やDPD試薬による分析等化学的な手法を用いて水質の変化を調べ，試行錯誤し，科学的に思考しながら目的に応じた水に変えていく実験の教材化を図った。

準 備

活性炭，亜硫酸カルシウム（以下亜硫酸Ca），ビタミンC，ゼオライト（市販の魚焼き用の石を活用），セラミック，陽イオン交換樹脂，サンゴ石，麦飯石，ペットボトル（ふたに穴をあけたものを底部に埋め込み，連結できる様に加工した200ℓのもの），フィルター（魚用水槽用のものなど），E B T 試薬，D P D 試薬，硝酸銀，パックテスト，殺菌剤（次亜塩素酸ナトリウム，オゾン），ミネラルウォーター

方 法

- (1) ペットボトルの下部にフィルターを詰め，その中に活性炭，亜硫酸Ca，ビタミンC，ゼオライト，イオン交換樹脂，サンゴ石などを

詰め，その上をフィルターで覆う。

- (2) 水道水，ミネラルウォーター，濁水等を出発として目的をもってつくりたい水をデザインする。
- (3) その後，そのためにどうするかを考え，ペットボトル内の充填物の性質やその必要量を調べた後，数種のペットボトルを連結・組合せてその水をつくる方法を確立していく。



図6 加工したペットボトル

- (4) それぞれのペットボトル通過前後の水にE B T 試薬やD P D 試薬，硝酸銀等を加え（パックテストやキレート滴定も）水質の変化を調べながら水をつくる方法を確立していく。
- (5) 化学的な手法を用いて目的の水ができたかどうかを確認する。
- (6) 亜硫酸CaやビタミンCの還元作用，ゼオライトや陽イオン交換樹脂の軟水化作用，サンゴ石などのミネラル増加作用についても化学的に分析を進める。

結 果

水のデザイン例としては，安全に飲める水，美味しい水，ミネラル（ Ca^{2+} ， Mg^{2+} ）豊富な水，洗浄用（風呂，洗面所）に適する水，色々な料理に適する水等が挙げられる。それぞれのペットボトルの接続例を以下に挙げる。

1 濁水から→飲料へ

【濁水→活性炭→亜硫酸Ca又はビタミンC→ゼオライト又はセラミック→殺菌剤】

2 水道水から→美味しい水へ

ア 残留塩素のみ除去

【水道水→亜硫酸Ca又はビタミンC】

煮沸だけでも十分除去可能（DPD試薬の発色で簡単に判断できる）。

イ 残留塩素 + におい + 濁り除去

【水道水→活性炭】

更に効果的なのは、上記に連続して亜硫酸Ca又はビタミンCの連結。

ウ 残留塩素 + におい + 濁り除去、ミネラル分添加

【水道水→活性炭→サンゴ石（麦飯石にも弱いミネラル増加効果が見られる）→亜硫酸Ca又はビタミンC】

3 水道水から→洗浄用水へ

【水道水→陽イオン交換樹脂（ゼオライトにも同様の効果（軟水化）が見られる。焼成するとこの効果が上昇した。）】

硬度の増減はEBT試薬を用いたキレート滴定で定量する。



図7 ペットボトル接続例

考 察

ペットボトル中の充填量（最適・必要最小量）や最適流出速度についても実験・考察させる。

おわりに

水は、最も身近にあり、最も貴重で基本的な物質の一つであり、水を通して様々な環境や人類の問題を多面的に考察することができる。

ここで紹介した教材は、水環境について、高等学校のみならず小学校→中学校→高等学校と段階・系統的に工夫を凝らして教育を進めていくことができる教材である。例えば小学校の「生物とその環境」において浄水の基本的なしくみとして扱い、水の保全や再利用及び水が有限の資源であるという視点での教材化を図ったり、中学校では、第1分野の「科学技術と人間」において、中和（酸とアルカリ）や酸化還元の基礎的な部分での導入を図ることなどが考えられる。また、この他に水について補完的に学習する方法としては、パックテスト（pH, COD, NO_2^- ）を用いて簡単にできる水質調査及び生活排水の教材などがあげられる。今後、活性汚泥の浄化能力（処理場では自然の力を再現していることを理解できる教材の考案）、土壌作用のモデル化・教材化、水に溶ける炭酸ガスの影響の測定、水と空気の接触による影響の測定、電気伝導率と水の純度について、DO（溶存酸素量）の測定と水の汚染について、SS（浮遊懸濁物質）の測定、有機ハロゲン物質（トリハロメタン等）の除去モデルの検討、化学物質・重金属や洗剤による汚染及び除去モデルの検討、窒素・リン等と富栄養化のモデルの検討を視野に入れて水の教材の検討を進めている。

参考文献

1) 浄水膜編集委員会 浄水膜 pp.1-29 技報堂出版 2003

（こしざか なおひろ 化学研究室研究員）

越坂