

分析化学における実験手順や物質概念の視覚化を志向した簡易教材

中 釜 達 朗

1 はじめに

2013年に全国2012の文系・理系学科に対して行われたベネッセ教育総合研究所の調査¹⁾によれば、「以前より学生の学力が低くなったことが問題になっている」と答えた学科は75.8%にのぼり、特に私立大学では79.4%と高比率であった。この傾向は現在でも続いており、いわゆる中堅以下の大学ではその傾向が強くなっているとも思える。分析化学においても実験書を読んで実験操作の全体像や単位操作の意味を理解できない、あるいは抽出や滴定などにおける物質移動や物質収支などを化学量論的に理解できない学生が散見される。最近、このような理工学系の化学系学生に対して実験操作²⁾や物質概念^{3)~5)}の視覚化を志向した教材が報告されたので紹介する。

2 実験操作を視覚化するためのフローチャート作成支援テンプレート

フローチャート作成は操作や考え方などを視覚化する行為であり、分析化学実験においては個々の単位操作の意味や関連性を俯瞰的に理解する機会となる。実際に分析化学実験に関してフローチャートを使った実験書⁶⁾も市販されている。しかしながら、学生はしばしば体裁にこだわりすぎ、フローチャート作成に長時間要することがある。本節では、フリーウェアを利用して簡易に化学実験用フローチャートを作成できるテンプレート²⁾を紹介する。

このテンプレートでは化学実験フローチャートを「化学実験における一連の操作及び化学物質の状態変化を表した図」と定義している。チャートの主たる構成要素は「対象物質」、ガラス器具など物質を留める「容器・器具」および「単位操作」である。分析化学実験において、

Simple Educational Materials for Visualizing Experimental Procedures and the Concept of “Amount of Substance” in Analytical Chemistry.

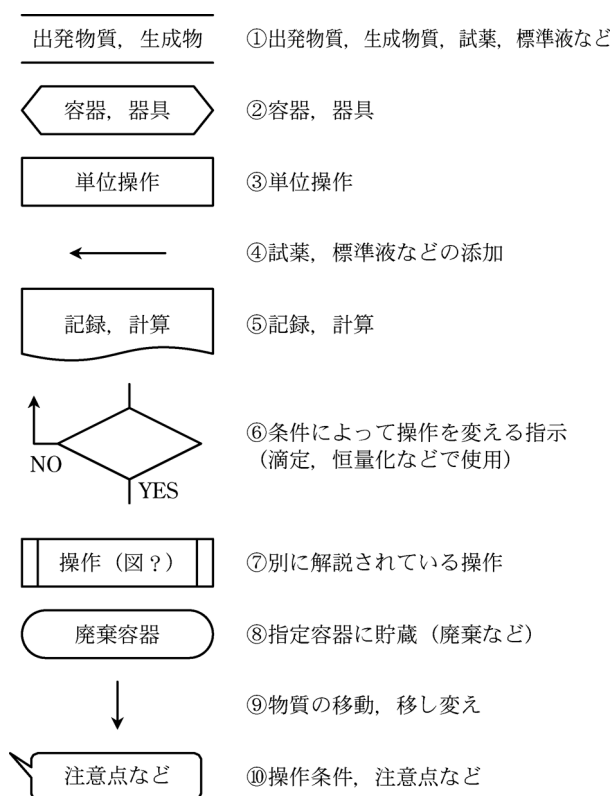


図1 フローチャート記号²⁾

「容器・器具」は測定精度やコンタミネーションの履歴を考える上で重要な要素である。記号の定義を図1に示す。レポートなどにおいて狭いスペースでもチャート全体が描画できるように単純な記号としている。図中、②(容器・器具)以外は実験書⁶⁾とほぼ同等であるが、②についてはJIS X0221(情報処理用流れ図・プログラム網図・システム資源図記号, 1986)の「準備」を示すフローチャート記号を割り当てている。フリーウェアには操作性やカスタマイズ性などの点から情報関係の実習などで使用例があるDynamic Draw[®]®)を使用している。テンプレートを図2に示す。このテンプレートは「化学実験フローチャート作成用テンプレート」として

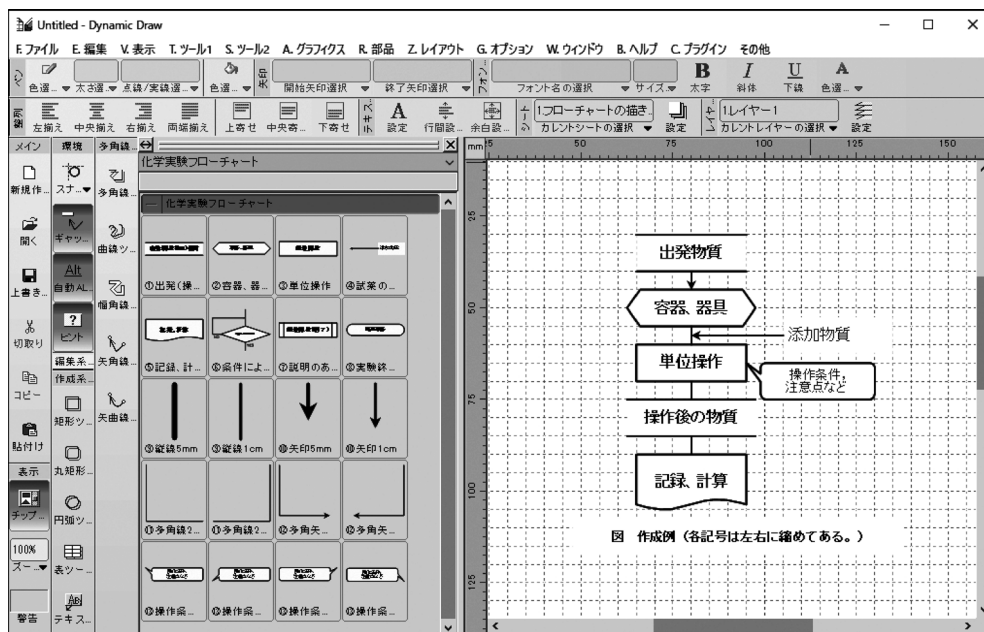


図2 テンプレート画面

Dynamic Draw® のライブラリー⁹⁾からダウンロード可能である。フローチャートの作成方法はおおむね以下のとおりである。

まず、実験手順に関する文中からフローチャート記号に該当する構成要素を抜き出す。次に、ワークシート(図2)画面左側のチップテーブルから該当する構成要素のフローチャート記号を選んでクリックし、そのまま画面右側にあるワークシートの任意の場所へドラッグ&ドロップする。ドロップ後、記号の文字部分をダブルクリックしてテキストを書き換える。続いて、各フローチャート記号を出発物質と操作後の物質(生成物質)に関する流れを「幹」にして上から下に配置する。試薬の添加は「幹」の右側に配置する。配置後、記号間を縦実線で結ぶ。物質の移動(容器への添加、移し替えなど)を示す部分には矢印(図1⑨)を使用する。必要に応じて多角線や矢印などを用いる。最後に配置を整え、吹き出し記号(図1⑩)で実験条件や注意点などを書き加える。なお、作成方法は動画プラットフォームYouTube®でも一般公開されている¹⁰⁾。登録記号の変更や追加などワークシートをカスタマイズする方法については既報²⁾を参照されたい。

3 物質概念を視覚化したボードゲーム型簡易シミュレーションシート

物質概念は化学量論や化学平衡論を議論する際に基本となる考え方である。しかしながら、知識の暗記に頼ってきた学生や計算の修得を通じて理解してきた学生の中には物質概念や物質収支などについて具体的なイメージが持てなかったり、希薄だったりする学生も多い。最近、単位物質質量を硬貨に置き換えたり³⁾⁴⁾、物質質量を

カードの数字で示したり⁵⁾して可視化し、化学実験容器や器具を模した図上で硬貨やカードを移動させたり、再配置することによって物質移動や物質収支、あるいは濃度変化などを視覚的に理解できる教材^{3)~5)}(ボードゲーム型簡易シミュレーションシート)が報告された。これらの概要を紹介する。

3.1 抽出における物質移動と物質収支を視覚化したシミュレーションシート

報告された抽出シミュレーションシート³⁾を図3に示す。A5版の用紙に分液漏斗を模した図が描かれており、漏斗中に水相(上層)と有機相(抽出相, 下層)が示されている。有機相体積は0.5Lとしている。これは配置されている硬貨の枚数から濃度を推算する際に、1L(単位体積)当たりの枚数に換算させ、「単位体積当たり存在する物質質量が濃度である」感覚を再確認させることが目的である。水相は有機相の4倍体積(2L)とし、図のように有機相と同じ体積に4分割されている。抽出対象物質1mmolを「硬貨1枚」とし、分割された水相エリアには同じ枚数になるように硬貨を配置する。図3のエリア境界線上に描かれている点線円内に硬貨を置いたとき、分割された水相エリアにそれぞれ1/2, 1/4枚の硬貨を配置したことになる。このシミュレーションシートでは、分液漏斗内の硬貨の総枚数に対する有機相エリアの硬貨枚数比が抽出率(E)に相当する。また、抽出対象物質は単一で系内において変化しない、すなわち、分配比は分配係数(K_D)に等しいと仮定している。この仮定では、分割された水相エリアに置かれている硬貨の枚数に対する有機相エリアにある硬貨枚数の比が K_D になる。水相および有機相の濃度(C_{aq}

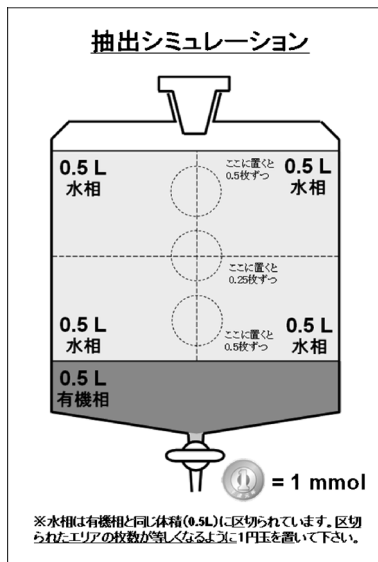


図3 抽出シミュレーションシート³⁾

および C_{org} , mmol/L) は 1 L エリアにある硬貨枚数を数える, あるいは 0.5 L エリアにある枚数を 2 倍すれば求められる。

例えば, 抽出前の C_{aq} が 5 mmol/L とすると水相に 10 枚の硬貨 (10 mmol 分) が配置される。この場合, 抽出率 0 から 1.0 まで 0.1 刻みで硬貨を配置することができる。配置例を図 4 に示す。例えば $E=0.5$ の場合, 10 枚の硬貨のうち, 5 枚が有機相エリアにある状態になる。有機相エリア (0.5 L) に 5 枚の硬貨があることから C_{org} は 10 mmol/L, 水相の 1 L エリアに 2.5 枚の硬貨があることから C_{aq} は 2.5 mmol/L, 濃度比である K_D は 4 となる。また, 両相での同一体積内の物質に着目しても, 水相の 0.5 L エリアにある硬貨は 1.25 枚であることから K_D は $5/1.25=4$ と推算される。

同じようなイメージを使って, さらに小数点以下の桁数が多い E での推算も可能である。例えば同じ抽出条件で $E=0.99$ のとき, 有機相エリアには「9.9 枚」, 0.5 L 水相エリアには $0.1/4=0.025$ 枚の硬貨が存在することになる。したがって, $K_D=9.9/0.025=396$, $C_{org}=19.8$ mmol/L, $C_{aq}=0.05$ mmol/L ($C_{org}/C_{aq}=19.8/0.05=396$) となる。さらに, $E=0.999$ では $K_D=9.99$ 枚/(0.01 枚/4) = 3996, $C_{org}=19.98$ mmol/L, $C_{aq}=0.005$ mmol/L ($C_{org}/C_{aq}=19.98/0.005=3996$) となる。なお, 本シートの使用例は YouTube[®] でも一般公開されている¹¹⁾。

3.2 滴定における化学反応を伴う物質収支を視覚化したシミュレーションシート

本教材⁴⁾は汎用性と一般性を考慮し, 酸塩基滴定, 酸化還元滴定など特定の滴定系ではなく滴定剤と分析対象成分が 1:1 で反応する系として設計されている。報告されたシミュレーションシートを図 5 に示す。A4 版の

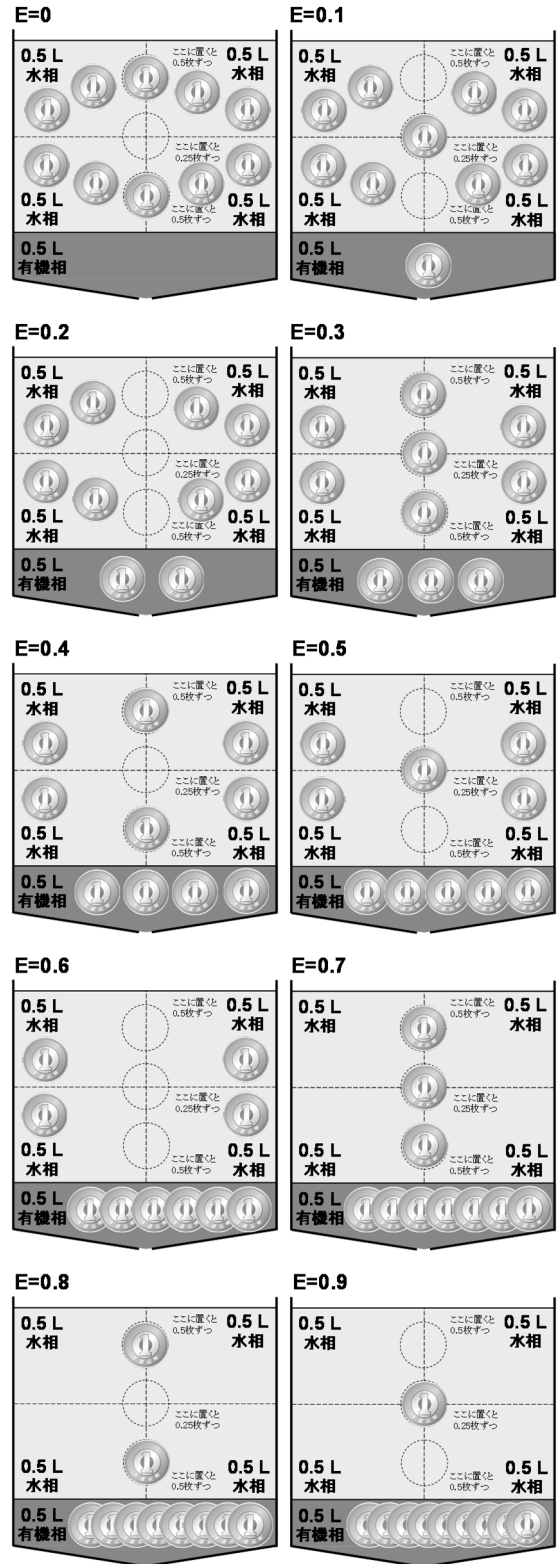


図4 抽出率 (E) 増加に伴う硬貨の配置変化³⁾

シートには, 滴定剤溶液を滴加する器具としてのビュレット (図 5 中, 左上) と滴定容器としてのピーカー (同下) を模した図が描かれている。また, 両図とも液体部分は 10 mL ずつ分割された小エリアで構成されている。ビュレットに充填する滴定剤溶液の体積は最大 40 mL, ピーカーに最初に入れる試料溶液の初期体積は 20 mL としている。また, 滴定剤 1 mmol を「1 円硬

貨), 分析対象成分(分析種) 1 mmolを「10円硬貨」, 生成物質 1 mmolを「1円硬貨を載せた10円硬貨」各1

枚ずつで表している(図5)。これらの硬貨は直径の異なる2種類の円形チップで代用できる。濃度が0.1 mol/L (1 mmol/10 mL)の場合, 10 mL分割エリアに1枚あるいは1組の硬貨が配置される(図5右上)。ビュレットおよびピーカー内では化学種は均一な濃度でなければならないので, 硬貨は10 mL分割エリアに均等な枚数になるように配置される。このシートではピーカー内の分析対象成分濃度(C_A)を0.15, 0.3, 0.45および0.6 mol/L, ビュレット内の滴定剤濃度(C_B)を0.3および0.6 mol/L, 滴加量を10, 20, 30および40 mLの設定で計32パターンのシミュレーションを前提としている。ピーカー内の溶液量は10 mL, 30 mLなど変更可能であることから, さらに多くのパターンでのシミュレーションが可能である。

例として, 分析対象成分を含む溶液($C_A=0.45$ mol/L) 20 mLを滴定剤溶液($C_B=0.3$ mol/L) 40 mLで滴定する場合の各硬貨の初期配置を図6上段左に示す。ピーカー内の分析対象成分溶液は20 mLなので, 2か所の

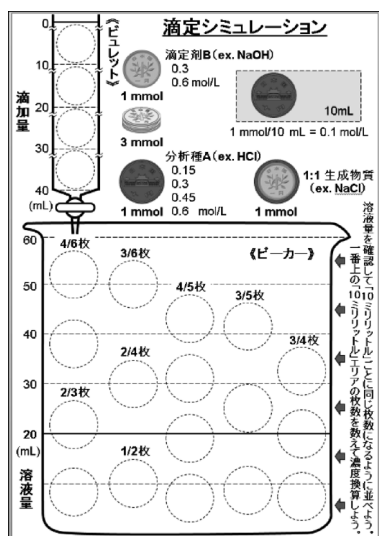


図5 滴定シミュレーションシート⁴⁾

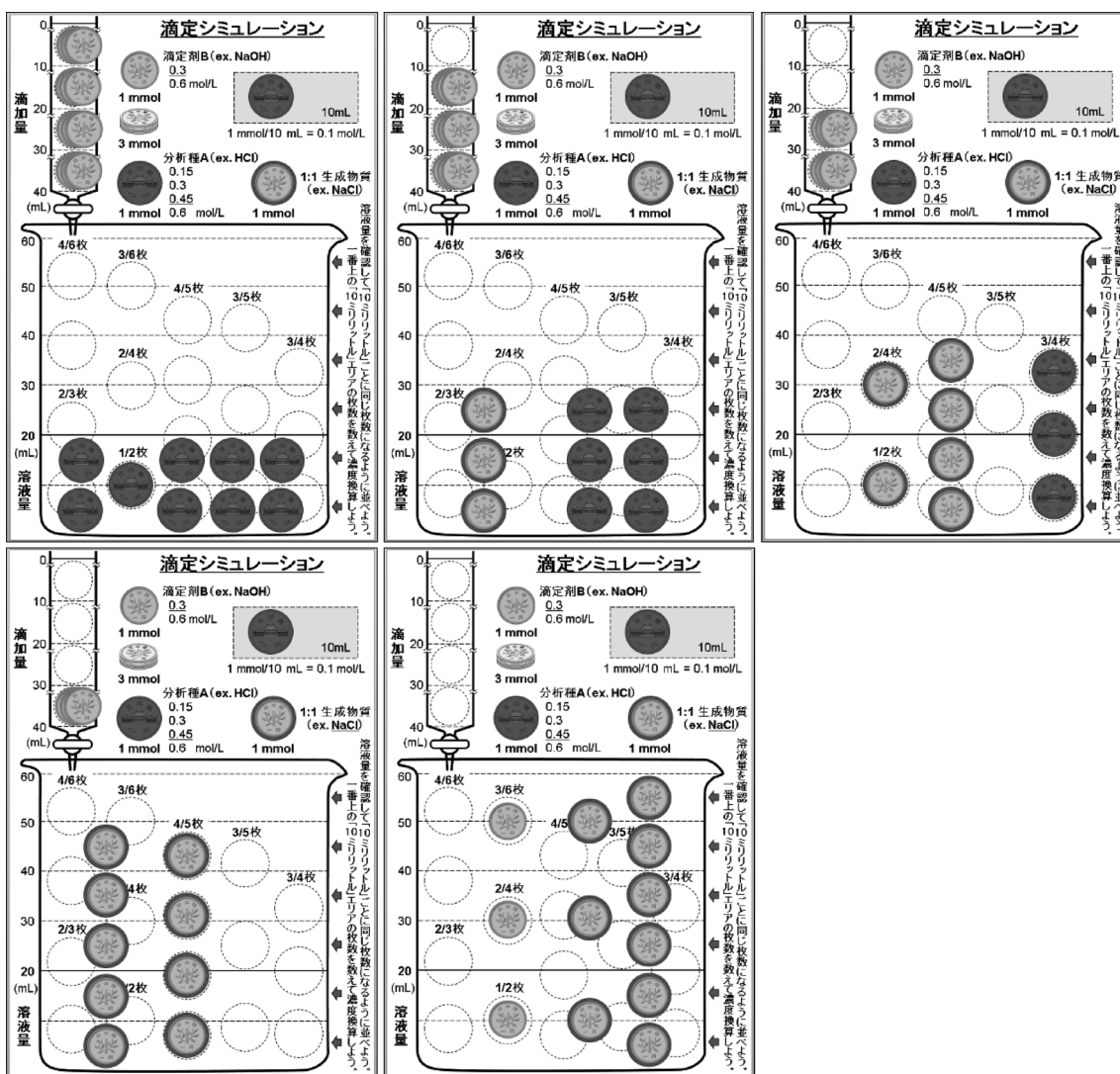


図6 滴定液滴加に伴う硬貨の配置変化⁴⁾
($C_A=0.45$ mol/L, $C_B=0.3$ mol/L)

10 mL エリアに 4.5 枚ずつ 10 円硬貨を配置する。一方、ビュレットの 10 mL エリアにはそれぞれ 3 枚ずつ 1 円硬貨を配置する。

ビュレットから滴定剤溶液を 10 mL 滴加した場合、ビーカー内の溶液は 30 mL となり、硬貨の配置は図 6 上段中央のようになる。3 mmol の滴定剤に相当する 1 円硬貨 3 枚がビーカーに移動し、ビーカー内は 10 円硬貨 6 枚と重ね硬貨 3 組となる。このとき、ビーカー内の 10 mL エリアには 2 mmol の分析対象成分に相当する 10 円硬貨 2 枚と、1 mmol の生成物質に相当する重ね硬貨 1 組がそれぞれ配置される。したがって、 C_A は 0.2 mol/L、生成物質の濃度 (C_{AB}) は 0.1 mol/L と推算される。

続いて、滴定剤溶液を 10 mL 添加したときはビーカー内溶液量が 40 mL となり、硬貨は図 6 上段右の配置になる。ビーカー内の 10 mL エリアに着目すると、0.75 mmol の分析対象成分に相当する 10 円硬貨 3/4 枚と 1.5 mmol の生成物質に相当する重ね硬貨 3/2 組がそれぞれ配置される。したがって、 $C_A=0.075$ mol/L、 $C_{AB}=0.15$ mol/L と推算される。さらに、滴定剤溶液を 10 mL 添加したとき (図 6 下段左) は重ね硬貨 9 組のみとなり当量点を示す。溶液量は 50 mL となり、ビーカー内の 10 mL エリアにはそれぞれ 1.8 mmol の生成物質に相当する重ね硬貨 9/5 組が配置されるので、 $C_{AB}=0.18$ mol/L と推算できる。滴定剤溶液をすべてビーカー内に滴加した場合 (同下段右) は、ビーカー内の溶液量が 60 mL となる。このとき、ビーカー内の 10 mL エリアにはそれぞれ 0.5 mmol の滴定剤に相当する 1 円硬貨 1/2 枚と 1.5 mmol の生成物質に相当する重ね硬貨 3/2 組が配置される。したがって、 $C_B=0.05$ mol/L、 $C_{AB}=0.15$ mol/L となる。なお、本シートの使用例は YouTube® で一般公開されている¹²⁾。

3・3 クロマトグラフィーにおける段理論を視覚化したシミュレーションシート

段理論はクロマトグラフィーにおける基本理論であり、連続多段抽出の原理で説明されることが多い。本教材⁵⁾は 2 枚のシミュレーションシートと 50 枚の物質質量カード (図 7) から構成される。A4 判の 2 枚のシートにはそれぞれ縦置きステンレス製分離カラムを模した図が描かれており、カラムの中に固定相と移動相が示されている。左側のシートが相対移動係数 (β)=1、右側のシートが $\beta=3$ を想定している。移動相は下から上へ流通させるデザインである。カラムの段数は、シミュレーション時間と作業の簡易性を考慮して 5 段としている。試料導入量は物質質量として約 1 μ mol (1024 nmol) としている。物質質量カードを用いることにより、 $\beta=1$ のシートでは $K_D=1/3, 1$ および $3, \beta=3$ のシートでは $K_D=1, 3$ および 9 の場合をそれぞれシミュレーションできる。シミュレーションの過程では物質質量を 1/4, 1/2 あるいは 3/4 にする必要があるので、カードには物質質量値の下にその 1/4, 1/2 および 3/4 の候補値を小さく併記している。また、50 枚のカードの中から使用するカードを選択しやすいように、物質質量の数値について 4 桁数字を黒色、3 桁数字を緑色、2 桁数字を青色および 1 桁数字を赤色で記載している。

図 8 に $\beta=K_D=1$ におけるカラム内での物質質量分布を 5 段目までシミュレーションした結果を示す。この場合、平衡時は移動相と固定相が同じ濃度になるように物質質量を決めるが、両相の体積が同じなので両相が同じ物質質量になるようにカードを並べる。まず、1 段目では両相に「1024」の 1/2 である「512」のカードをそれぞれ置く (図 8(1))。移動相内のカードだけを 2 段目に移動させ (同(2))、各段でそれぞれ「512」の 1/2 である「256」のカードを両相に置く (同(3))。次に、移動相内にある 2 枚のカードを次段にそれぞれ移動させ (同

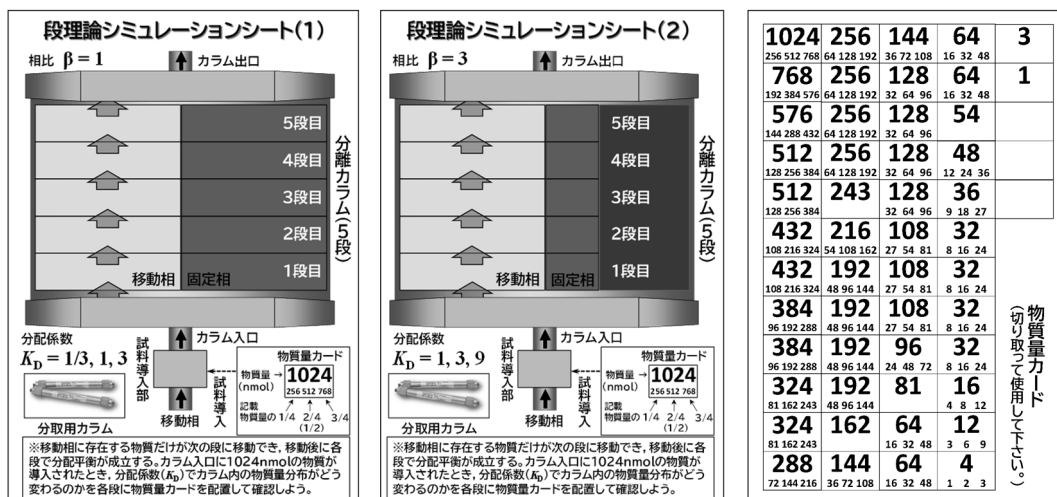


図 7 段理論シミュレーションシート⁵⁾

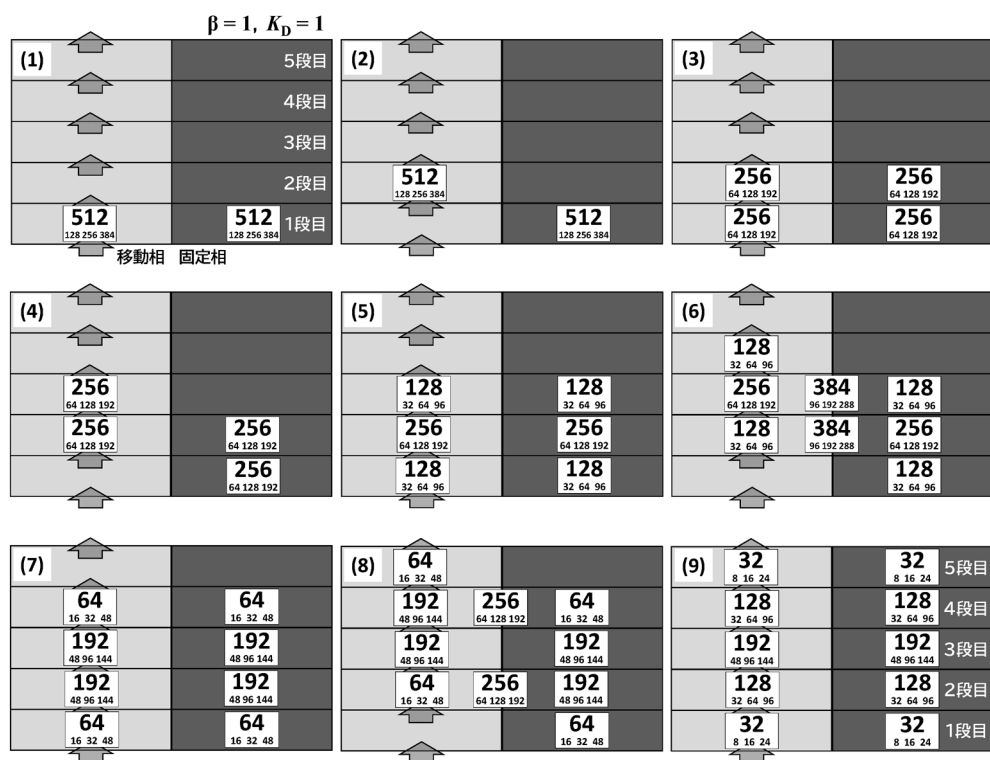


図 8 溶質の移動に伴うカードの配置変化 ($\beta=K_D=1$)⁵⁾

(4), 各段で段内合計値の 1/2 数のカードをそれぞれ両相に置く (同(5))。続いて, 移動相内にある 3 枚のカードを次段にそれぞれ移動させ, 2 および 3 段目は段の合計値に相当するカードをそれぞれ置いた後 (同(6)), 段内合計値の 1/2 数のカードを両相にそれぞれ置く (同(7))。最後に, 移動相内にある 3 枚のカードを次段にそれぞれ移動させた後, 2 および 4 段目は段の合計値に相当するカードをそれぞれ置き (同(8)), 合計値の 1/2 数のカードを両相にそれぞれ置く (同(9))。このシミュレーションでは, 移動相と固定相に存在する溶質の物質質量比から保持係数 (k) が求められる。また, 移動相はカラム内では 1 段目から 5 段目まで 4 段移動していることになり, 溶質は最も物質質量が多い段数まで移動したとして, 移動率 (カラム内での移動相の移動距離に対する溶質の移動距離比, R) が推算できる。例えば $\beta=K_D=1$ (図 8(9)) の場合, 両相の物質質量比から $k=1$ となる。また, 移動相は 1 段目から 5 段目まで 4 段移動しているのに対し, 溶質は 1 段目から最も物質質量が多い 3 段目まで 2 段移動しているとして $R=2/4=1/2$ となる。

4 おわりに

以上, 分析化学実験フローチャート作成のための支援教材と抽出, 滴定および段理論を分子量の概念で理解するためのボードゲーム型シミュレーション教材を紹介した。

フローチャート作成は Microsoft Powerpoint® など

の既製ソフトを用いても可能であるが, 記号の位置合わせが難しかったり, 記号の大きさに対して文字が小さく, フローチャート自体が大面積になったりすることがある。ここでご紹介したテンプレートはグリッドで移動位置が決まるので記号の位置合わせが比較的容易であり, かつ判読できる文字の大きさをフローチャート自体をコンパクトにまとめられる利点がある。一方, ボードゲーム型シミュレーション教材は抽出, 滴定あるいはクロマトグラフィーにおける物質収支, 物質質量分布や濃度, あるいは相間の物質質量比や濃度比などを限られた条件ではあるが計算せずに求めることができる。したがって, 計算で理解できる学生側にとっても計算の正誤を自分で確認できる利点がある。教員側にとっても物質移動や化学反応による物質質量や濃度変化などを一連の過程として短時間で教授できる。また, シートを拡大印刷すれば対面授業のアクティブラーニングにも適用でき⁵⁾, Microsoft Powerpoint® などのスライド背景にすればオンライン授業用教材としても使用できる。

これら教材の操作方法や操作の前提となるルール自体は難しくないので, 大学だけではなく高校以下の教育課程でも利用できると考えられる。実際に教育現場で利用されることにより, 化学量論を正しくイメージできる大学生や化学に興味を持った中・高校生が増えることを願う。

文 献

- 1) 高大接続に関する調査, ベネッセ教育総合研究所 (2014),

<https://berd.benesse.jp/koutou/research/detail1.php?id=4338> (2021年2月27日, 最終確認).

- 2) 中釜達朗: 工学教育, **62**, 21 (2014).
- 3) 中釜達朗: 工学教育, **66**, 89 (2018).
- 4) 中釜達朗, 南澤宏明: 工学教育, **66**, 68 (2018).
- 5) 中釜達朗: 工学教育, **68**, 33 (2019).
- 6) 浅田誠一, 内出 茂, 小林基宏: “図解とフローチャートによる定量分析 (第二版)”, (1998), (技報堂出版).
- 7) 浅田誠一, 内出 茂, 小林基宏: “図解とフローチャートによる定性分析 (第二版)”, (1999), (技報堂出版).
- 8) Dynamic Draw ホームページ <https://dynamicdraw.com/ja/> (2021年2月27日, 最終確認).
- 9) Dynamic Draw ライブラリー <https://dynamicdraw.com/ja/libraries/> (2021年2月27日, 最終確認).
- 10) YouTube, 化学実験フローチャート作成支援テンプレートの使用方法 <https://www.youtube.com/watch?v=l7iEB3Z6Ax8> (2021年2月27日, 最終確認).
- 11) YouTube, 1円玉で抽出率と分配比 (分配係数) との関係

について考えてみる <https://www.youtube.com/watch?v=EQDcYXqKxQI> (2021年2月27日, 最終確認).

- 12) YouTube, 1円玉と10円玉で滴定におけるピーカー内の化学種の種類と濃度変化について考えてみる <https://www.youtube.com/watch?v=xQy4iKwutXU> (2021年2月27日, 最終確認).



中釜達朗 (Tatsuro NAKAGAMA)

日本大学生産工学部応用分子化学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)。東京都立大学大学院工学研究科応用化学専攻修士課程修了。工学 (博士)。教育士 (工学・技術) (日本工学教育協会)。《現在の研究テーマ》環境調和型抽出・分離・検出システムおよび化学教育用教材の開発。《主な著書》“基礎教育シリーズ 分析化学”, (東京教学社), (共著)。《趣味》素人短歌, 将棋中継の視聴 (観る将)。

原稿募集

創案と開発欄の原稿を募集しています

内容: 新しい分析方法・技術を創案したときの着想, 新しい発見のきっかけ, 新装置開発上の苦心と問題点解決の経緯などを述べたもの。但し, 他誌に未発表のものに限ります。

執筆上の注意: 1) 会員の研究活動, 技術の展開に参考になるよう, 体験をなるべく具体的に述べる。物語風でもよい。2) 従来の分析方法や装置の問題点に触れ, 記事中の創案や開発の意義, すなわち主題の背景を分かりやすく説明する。3) 図や表, 当時のスケッチなどを用いて理解しやす

くすることが望ましい。4) 原稿は図表を含めて4000~8000字 (図・表は1枚500字に換算) とする。

◇採用の可否は編集委員会にご一任ください。原稿の送付および問い合わせは下記へお願いします。

〒141-0031 東京都品川区五反田1-26-2

五反田サンハイツ304号

(公社)日本分析化学会「ぶんせき」編集委員会

[E-mail: bunseki@jsac.or.jp]