

## 分析化学における化学平衡計算をいかに教えるか

### —簡易分子模型と表計算ソフトの利用—

向井 浩\*

#### 1 研究の背景

##### 1.1 化学平衡計算

化学平衡論は、化学反応を利用した定量分析の背景にある基本理論である。このため、化学平衡の理解と応用は、分析化学の基本的な学習内容となっている。化学平衡の理論は、実験で得た定量値に理論的裏付けを与えると共に、今後の実験結果の予測をも与える。このような理論と実験の往還を示すことのできる初歩的な学習課題が、pHの測定と化学平衡計算である。

しかし一方で、pHの化学平衡計算においては、学習に困難さが感じられる点がいくつかある。計算の流れは、化学平衡の法則と、物質と電荷の保存則（物質収支則と電荷均衡則または電気的中性則）を数式で表現し、連立方程式を解いてpHの理論値を求めることである。ここで学習の障壁となると考えられるのは、法則そのものの理解、法則と数式との対応関係、複数の式の連立による方程式の導出、及び、高次方程式の解の導出である。

これらの難点の解決に、簡易分子模型と表計算ソフトの利用が有効と考え、これらの教材の開発と利用方法について検討した。

##### 1.2 高大接続改革

平成26年12月22日に、高等学校と大学の教育、及び、これら二つの接続（高大接続）についての改革案が、中央教育審議会の答申とし

てまとめられた<sup>1)</sup>。その背景には、「生きる力」の一要素である「確かな学力」についての考え方があり、「確かな学力」を構成する「学力の三要素」とは、「基礎的な知識及び技能」、「これらを活用して課題を解決するために必要な思考力・判断力・表現力等の能力」、及び、「主体的に学習に取り組む態度」である。これらを着実に身に付けさせる方策として、中央教育審議会の答申は、アクティブ・ラーニング等を取り入れた教育の質的転換の断行を掲げている。アクティブ・ラーニングとは、学修者の能動的な学修への参加を取り入れた教授・学習法のことである。ここでは、教員による一方的な講義形式の教育とは異なる、学生参加型の授業が求められている。

こうした教授法の変化の流れを視野に入れると、簡易分子模型や表計算ソフトなど、生徒・学生が主体的に利用でき、「発見」や「問題解決」の場が導入可能な教材とそれを用いた授業が、今後一層、必要とされると思われる。

#### 2 表計算ソフトの利用

##### 2.1 化学平衡計算の手順

表計算ソフトは、pHを求める一連の計算の流れの全体で用いることができる（図1）。さらに、設定条件を変化させてpHの変化を見るシミュレーションとしての利用も可能である。

図1で示された計算原理から方程式の導出、

\*京都教育大学理学科教授、海洋化学研究所監事

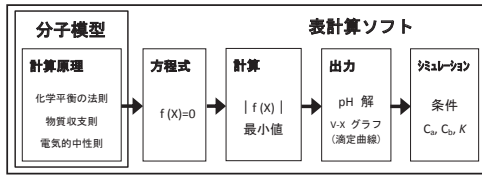


図1 化学平衡計算における表計算ソフトと分子模型の役割

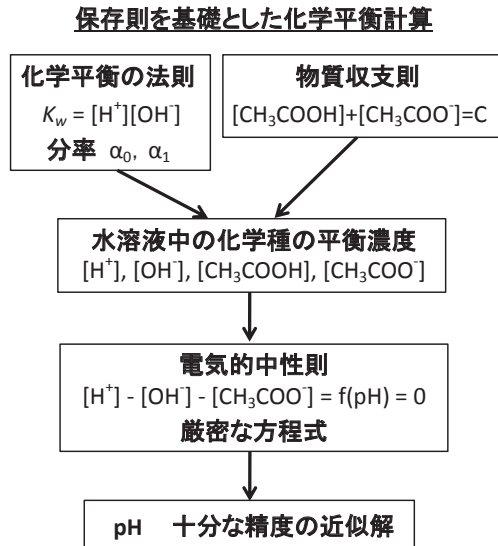


図2 pHの化学平衡計算の流れ

さらに解の出力までの流れをより詳細に示すと、図2となる。化学平衡の法則と物質収支則から各化学種の平衡濃度をpHの関数として表現し、これらの式を電気的中性則に当てはめて、近似のない厳密な方程式を導出する<sup>2,3)</sup>。方程式の解法には、表計算ソフトの「ソルバー」または「ワークシート関数」の機能を利用した数値解法<sup>2,3)</sup>を用いる。これによって十分な精度の近似解を得ることができる。

表計算ソフトを用いる際に工夫した点は、「定義された名前」の機能、逐次計算、及び、発展的構成の3つである。「定義された名前」の機能を用いることで、文字式の通りに式を入力することを可能とした。次に、ワークシート上で

逐次的に数式を立てていくことで、方程式を段階的に導出できるようにした。さらに、水溶液系を簡単な系から複雑な系へと段階的に移行させることで、発展的に学習できる構成とした。

## 2.2 表計算ソフトの利用の実例

発展的構成となるように、3種類のワークシートを準備し、これらを順番に用いて段階的に学習できるように配慮した。

第1のワークシートでは、計算原理から方程式の導出までを学ぶことに主眼を置いた。すなわち、物質収支則等の法則の理解と数式化、及び、電気的中性則からの方程式の導出が学習の狙いである。方程式の解法には「ソルバー」を用い、表計算ソフトが持つ変数の最適化の機能をそのまま利用した。同一のワークシート上で、純水、強酸、強塩基、弱酸、弱酸の塩、及び、それらの混合溶液のpHを求める方程式を導出する構成としている<sup>4)</sup>。これにより、簡単な系から複雑な系へと発展的に学習できるようにした。

第2のワークシートでは、「ワークシート関数」の機能を用いて方程式を解く<sup>2,4)</sup>。そのワークシートを図3に示す。混合溶液の系を対象に、逐次計算により段階的に複雑な方程式を導出できるように構成している。

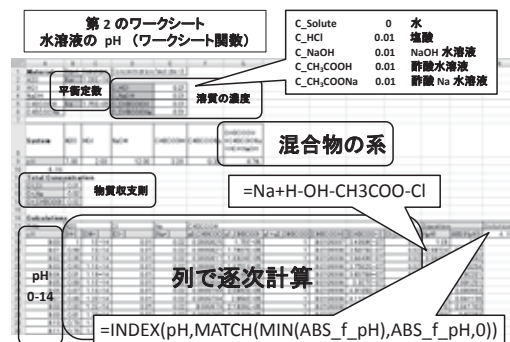


図3 水溶液のpHを求めるワークシート

第3のワークシートでは、理論中和滴定曲線を描く。中和滴定曲線は、滴定試薬の滴加量に対する水溶液のpHの変化を示した曲線である。このため、滴加量を0から連続的に変化させて、対応する水溶液のpHを「ワークシート関数」を用いて算出し、得られた数値群を散布図に描くことで、滴定曲線が得られる<sup>2,4)</sup>。

以上のワークシートいずれにおいても、設定条件の値を変更することで、その条件下での計算結果を出力させることができる。このため、条件を変化させてpHや滴定曲線の変化を見る、シミュレーションも可能である。

表計算ソフトを用いた化学平衡計算の学習の特色と利点は、以下のようにまとめられる。

計算そのものより、その背景にある法則を重視するので、原理についての理解が深まる。物質収支則と電気的中性則の保存則に着目できる。近似式を用いないので、濃度条件の制約を受けない。「定義された名前」を用いるので、文字式通りに式を入力することができる。逐次計算と発展的構成により、表計算ソフト上で段階的に学習できる。表計算ソフト上での仮想実験や他の滴定系への更なる発展が可能である。

平成19年8月20-24日に実施された日英高校生サイエンスワークショップin京都2007(京都教育大学附属高等学校スーパーハイスクールサイエンス事業)の中で、日本と英国の高校生8名を対象に、表計算ソフトを用いた理論中和滴定曲線の作成と、これを利用した無機炭酸濃度の測定を行った<sup>5)</sup>。表計算ソフトを用いた化学平衡計算の学習が、高校生を対象としても可能であることが実証できた。

### 3 簡易分子模型の利用

#### 3.1 操作型分子模型の製作

法則等の計算原理の理解を助けるために、化

学反応の操作が可能な分子模型群を利用することを考案した(図4)。模型により分子を可視化し、分子模型の数を数えることで、物質の量的関係を具体的に捉えられるようにすることを意図している。これにより、抽象的に表現される保存則の量的関係が、具体物を通して生徒に把握されることが期待される。また逆に、具体物の操作から抽象的な法則を自ら見出すことも期待される。このように、抽象と具象の往還により、計算原理の理解を深めることを狙っている。

分子模型は、角材、磁石、及び、ラベルを用いて製作した<sup>6)</sup>。分子の構造を示す模型ではなく、量的関係の把握を目的とした模型であるため、模型の形状は単純な角柱形とし、15 mm角ヒノキ材を材料に製作した。電離反応を表現するため、陽イオンと陰イオンの分離と結合が可能となるように、接着面に磁石を用いた。磁束密度105 mT、直径6 mm、高さ2 mmの円柱形のフェライト磁石を、角材の切断面に埋め込み、正、負イオンの電荷を磁石のS、N極に対応させた。イオンの化学種を明示するため、化学式を印字したテプララベルを角材の表面に貼り付けた。図4に製作した簡易分子模型を示す。



図4 簡易分子模型で表現できる化学種

### 3.2 分子模型の利用の実際

高校化学における塩の加水分解の学習で利用することを想定し、水分子 10 分子と酢酸ナトリウムのイオン対 5 対を一式として、酢酸ナトリウム水溶液を模式的に表現した。これら一式の簡易分子模型群に対し、電離と結合の操作をすることで、様々な化学反応の終状態をつくることができる。得られる終状態の種類と数を表に示す。全部で 27 通りの組み合わせがある。

表から、弱酸の塩の加水分解により、水溶液が塩基性を示すことが読み取れる ( $[\text{H}_3\text{O}^+] < [\text{OH}^-]$ )。また、全ての組み合わせに対して、物質収支則 ( $[\text{CH}_3\text{COO}^-] + [\text{CH}_3\text{COOH}] = \text{一定}$ ) と電荷均衡則 ( $[\text{Na}^+] + [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{CH}_3\text{COO}^-] + [\text{OH}^-]$ ) の関係が成り立つことが見て取れる。逆に、表中の量的関係から物質収支則と電荷均衡則に気付かせ、その物理的意味を考えさせることも可能である。これらのことを、生徒による分子模型の操作と、結果についての議論を通して行うことで、生徒による主体的な取り組みとなることが期待される。

表 簡易分子模型で表現できる反応の数

No.	CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>
1	0	5	10	0	0	5
2	0	5	8	1	1	5
3	0	5	6	2	2	5
4	0	5	4	3	3	5
5	0	5	2	4	4	5
6	0	5	0	5	5	5
7	1	4	9	0	1	5
8	1	4	7	1	2	5
9	1	4	5	2	3	5
10	1	4	3	3	4	5
11	1	4	1	4	5	5
12	2	3	8	0	2	5
13	2	3	6	1	3	5
14	2	3	4	2	4	5
15	2	3	2	3	5	5
16	2	3	0	4	6	5
17	3	2	7	0	3	5
18	3	2	5	1	4	5
19	3	2	3	2	5	5
20	3	2	1	3	6	5
21	4	1	6	0	4	5
22	4	1	4	1	5	5
23	4	1	2	2	6	5
24	4	1	0	3	7	5
25	5	0	5	0	5	5
26	5	0	3	1	6	5
27	5	0	1	2	7	5

化学平衡は、何通りもの組み合わせがある状態の中で、ギブズ自由エネルギーが最小となる状態として捉えることができる。しかし、系のエネルギーについての情報をこの分子模型からは得ることはできない。この点は、この簡易分子模型の役割の限界を示すものである。

平成 22 年 8 月 10-13 日に実施された京都教育大学附属高等学校主催の京都サイエンスワークショップの中で、高校生 2 名を対象に、簡易分子模型を用いたアクティブ・ラーニング型の授業実践を行った<sup>7)</sup>。対象者が少ないものの、アンケート調査により受講者の理解度を推し量った。調査結果から、物質収支則、電荷均衡則の理解に効果があることが伺えた。

### 4 まとめ

本研究の成果として、化学平衡計算の理解に役立つ表計算ソフトを用いた教材を開発した。また、計算原理の理解に役立つ操作型の簡易分子模型を用いた教材を開発した。

今後の課題として、表計算ソフトと簡易分子模型を用いた授業案の開発と、開発した授業の評価と教材の効果の検証が挙げられる。

### 参考文献

- 1) 中央教育審議会，“新しい時代にふさわしい高大接続の実現に向けた高等学校教育、大学教育、大学入学者選抜の一体的改革について（答申）”，[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1354191.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo0/toushin/1354191.htm).
- 2) 向井浩・山本哲生・山根良行，化学と教育，**53**，714-717 (2005).
- 3) 宗林由樹・向井浩，基礎分析化学，サイエンス社 (2007).
- 4) 向井浩，“保存則を基礎とした表計算ソフ

トによる化学平衡計算”，平成 22 年度日本理科教育学会近畿支部大会発表論文集，p.33 (2010).

- 5) 向井浩・前早織，化学と教育，**58**，376-379 (2010).
- 6) 小野聖太・向井浩，“高校化学における「塩の加水分解」に関する分子模型教材の検

討”，平成 22 年度日本理科教育学会近畿支部大会発表論文集，p.63 (2010).

- 7) 小野聖太・向井浩，“高校化学における「塩の加水分解」についての分子模型を用いた教育実践”，日本化学会第 91 春季年会講演予稿集Ⅱ，p.553 (2011).