

パソコンセンサーを活用した高校化学教育

那須悦代*, 喜多雅一**

現行の学習指導要領では、改訂時の9項目の視点の1項目として、「情報化」する社会への適切な対応が求められている。「理科」等においても内容の取り扱いの項に、「各科目の指導にあたっては、実験データの処理、実験の計測などにおいてコンピューターを積極的に活用するよう配慮するものとする」が明示された。しかし、「理科」の本質である「探究」の過程で、コンピューターの特性を生かし、どのように活用できるのかが大きな課題であり、「情報化」に対応した教育課程や教材が理科の教科目標のひとつである「科学的概念を深めること」に有効かどうかを絶えず検証することが重要である。本研究では、パソコンセンサーを利用し、科学的概念を深めることができる、また高校化学における発展的な探究活動で取り扱うことのできる教材開発のあり方について考察する。

〔キーワード：パソコンセンサー・探究・溶解熱・中和熱・電気分解〕

I. はじめに

2003年4月に高等学校に導入された新教育課程の内容を見ると、「理科基礎」「理科総合」の科目が新設されたものの、これまでの中学校理科の内容が高校に移行し、補完する意味合いも含まれている。大部分の生徒が履修していた「化学I B」4単位に比べて、内容が減少した「化学I」は3単位となった。

また、今回の学習指導要領の改訂¹⁾では、「ゆとり」のなかで「生きる力」をはぐくむことが大きな目標となっているが、改訂の視点9項目の中の1項目として、「情報化」する社会への適切な対応が求められている。

高校版²⁾では、教科として「情報」が新設され、「理科」等においても内容の取り扱いの項に、「各科目の指導にあたっては、実験データの処理、実験の計測などにおいてコンピューターを積極的に活用するよう配慮するものとする」が明示された。

新教育課程実施により、高等学校における情報教室の改修・情報機器の導入などが推進されているが、新設された科目「情報」の免許を持つ指導者は不足している状況にある。

1990年代の「化学と教育」誌では、高校におけるパソコンの活用について、電位差測定による中和反応のpH変化や酸化還元滴定への応用³⁾、圧力センサーを利用した気体の発生や分子量の測定^{4) 5) 6) 7)}、熱センサーによる溶解熱の測定^{8) 9)}、などいくつかの報告がなされている。

さらに、学習指導要領改訂に伴う新しい教科書を調査すると、各社が章末・巻末等にコンピューターの活用法を紹介している^{10)~15)}。「反応熱の測定・中和滴定曲線な

どに利用できる」「データの種類によっては記録・処理に活用できる」と記されている。

ある教科書¹³⁾には、「コンピューターを利用したヘスの法則の検証」が、発展的な探究活動として、2ページにわたり取り上げられている。しかし、その実験内容は、従来のものとなんら変わりなく、センサーを用いる測定器具としての活用である。

たとえば、高校における通常の実験は3~4人の班活動で実施されることが多く、「ヘスの法則の検証」の実験は、ストップウォッチと温度計を使用し、記録者も含めて生徒が分担していた協同活動であった。試薬の調整等を教師側で準備すると、実験器具とセンサーの設置をすれば、パソコンの画面を見るだけの活動となり、コンピューターの活用によって、一人一人が主体的に参加し理解しようとする活動形態ではなくなる可能性がある。

パソコンセンサーを用いる利点としては、計測・データ処理の高速化により、連続的でわずかな変化の測定を迅速にデジタル表示できることである。一方、これまで生徒が主体となって自分の五感で体験していた実験ではなくなる。すなわち、パソコンの特性を活かした実験ではなく、通常の化学実験の代替として用いられると、体験活動としての要素が希薄になる可能性がある。

また、現行の教科書の「反応熱」におけるパソコンの活用は、化学選択生徒のための発展的な探究活動とするには、内容面で発展性がなく、探究活動としても不十分である。

日本の化学の教科書には、「反応熱」に関する単元はあるが、海外の教科書で扱われている、「エンタルピー」や「エントロピー」の概念は登場せず、「自由エネルギー」に

* 鳴門教育大学大学院生、和歌山県立耐久高等学校教諭

** 鳴門教育大学理科教育講座

についての記述はない。

本研究では、パソコンセンサーでなければできないデジタル測定を活用し、高校化学における発展的な探究活動の教材への導入を考察した。

従来の測定の利点である体験しながら科学的概念を深めていた意義を失うのではなく、高校化学が本来到達すべき探究中心の学習が、パソコンセンサーにより可能となるような教材開発をめざした。

今回教材に用いたのは、スズキ教育ソフトのキューブセンサーネットの計測ソフトと、センサーをコンピューターでコントロールできるデータロガーおよびそのセンサーである。¹⁶⁾

II. 溶解熱の測定と格子エンタルピー¹⁷⁾



図1 パソコンセンサーを利用した溶解熱の測定

まず、わずかな熱量変化でも計測できる熱センサーの特性を活かし、金属塩の無水塩および水和物の水への溶解による温度変化を測定する教材について紹介する。

また、単に発熱・吸熱の現象を理解するだけでなく、水溶液中における水和エンタルピー（水和による安定化）と格子エンタルピー（イオン結合力の強さ）の観点から考察し、結晶水（配位水・格子水）の効果を考察できる。

硫酸塩の無水塩（ CuSO_4 、 CoSO_4 、 ZnSO_4 、 MgSO_4 ）の溶解は発熱反応であり、水和物（ $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ）の溶解は吸熱反応である。

次に、塩化物について、同様にして、無水塩と水和物の水への溶解熱を求めると、無水塩（ CoCl_2 、 NiCl_2 、 CuCl_2 、 CaCl_2 、 SrCl_2 ）の溶解熱は、すべて発熱である。しかし、水和物は、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の溶解が吸熱であるのに対し、 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ は発熱である。

つまり、金属塩の結晶内における結晶水の数が、水溶液中の水分子の配位数より少ない場合、溶解熱が発熱になることを、液温センサーを用いる測定により示すことができる。

発熱する無水塩と吸熱する水和物の違いは次のように考えられる。結晶水を含む塩ではあらかじめ結晶水の存在によって水和エンタルピー分の安定化がすでになされており、格子エンタルピーによる吸熱の寄与が勝っている。ところが、無水塩では、大きな水和エンタルピーによる安定化が格子エンタルピーに勝っており、発熱となる。このことを、多くの塩の溶解熱を測定することで、明らかにすることができる。

また、 SmCl_3 、 NdCl_3 の無水塩と水和物の水への溶解による温度変化を測定し、溶解熱と格子エンタルピーを求めることができる。無水塩の溶解は発熱であり、水和物も無水塩より値は小さいが発熱する。これらランタノイド塩の水和物の溶解熱は、今回初めて求められたものである。

SmCl_3 、 NdCl_3 とともに、六水和物であるにもかかわらず、水への溶解が発熱反応になることから、水溶液中で Sm^{3+} 、 Nd^{3+} に配位する水分子は6個より多いと考えられる。文献によれば¹⁸⁾、水溶液中の Nd^{3+} は9配位の三面冠三方柱型であると記されており、さらに3個の水分子が水和水として付加できるので、発熱に寄与していると解釈できる。

以上より、パソコンセンサーによる、わずかな温度変化の迅速な測定と表示が可能となり、比較的簡単な実験で、溶解熱に関して、文献値¹⁹⁾に匹敵する精度の結果が得られる。

特に、無水塩と水和物の溶解熱を比較し、エンタルピーの観点から、溶解現象・水和イオンについて理解を深める教材として適していると考えられる。

さらに、結晶水には配位水と格子水という異なるタイプがあることを議論する教材ともなる。

またランタノイド塩などの溶解熱測定のように、これまで研究されていない塩の溶解熱についても、簡便な方法でデータを得られ、発展的な探求学習に適する。

III. 電気分解への応用²⁰⁾

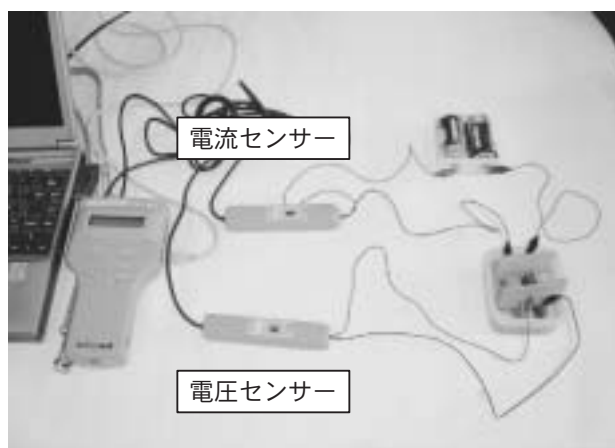


図2 パソコンセンサーを利用した電気分解

高校の教科書で扱われている，化学実験「電気分解によるファラデー定数の決定」²¹⁾や，「電気メッキを利用したアボガドロ数の決定」²²⁾では，硫酸銅水溶液の電気分解が取り上げられている。この時，電極の前処理をしていない場合，時間とともに電流の値が変化し，誤差を生じることはよく起こる現象である。特に，大きな電源装置などを使わずに，乾電池を使用し少量の電解質溶液を用いる小さなスケールの実験²³⁾などの場合，誤差は大きくなる。

そこで，パソコンセンサーを利用することにより，電流・電圧の時間変化を記録し，前処理なしに，正確なファラデー定数の決定が可能かどうかを検討するとともに，前処理における両極の変化について考察する教材・活動が可能となる。

極板距離（6 cm，4 cm，2 cm），極板面積（15 cm²，7.5 cm²）を変え，前処理なしで，センサーで電流と電圧を5分間測定し，溶液の抵抗値とファラデー定数が計算できる。

それにより，電圧が高く，溶液の濃度が高いほど，電流の値が変化することや，電圧が高くて極板距離が近づきすぎると，析出が激しすぎてファラデー定数を求められないことがわかる。

極板距離が遠いとき（6 cm）・極板面積が小さいとき（7.5 cm²）・溶液濃度が低いとき（＜0.2 mol/l）には，誤差が大きくなる。この時，溶液中に黒い粉末の沈殿が生じており，銅が陰極にうまく付着しなかったための誤差と考えられる。つまり，電流値があまりに小さいときには，電極反応が定常的に起こらない。

溶液の電気抵抗は，極板距離に比例し，極板間の断面積に反比例すること，また，水溶液の場合，水の伝導率は無視できる程度であり，溶質のイオンの濃度と伝導率を考えればよいので，もし完全に電離していれば，電気抵抗は溶液濃度に反比例することが知られている²⁴⁾。

今回のパソコンセンサーにより，溶液の電気抵抗が極板距離に比例すること，溶液濃度に反比例することが確かめられる。このように電解質溶液の「抵抗」の働きを調べるのに，パソコンセンサーの特性を活かすことができる。

高校化学の実験では，「ファラデーの法則」を確認するために扱われる実験であるが，電極反応における電流・電圧・電極の面積・電極間の距離・電解質の濃度など，最適な実験条件を求める活動に用いることができる。

さらに，パソコン上に描かれた記録紙の面積（質量）から電気を計算することができるので，前処理なしにファラデー定数を求めることができる。実際に電解時間が5分と短いため，陰極上の銅の析出量が少なく精度は幾分落ちるが，前処理なしで，ほぼ理論値に近いファラデー定数が得られる。

また電流と電圧を同時に測定しているので，Cu-Cu 極・Cu-Fe 極ともに，時間とともに抵抗値が減少していることが確認できる。電流を流し始めて約60秒間は，抵抗値が大きく減少し，約5分後にほぼ一定となる。これを前処理とよぶ。これは，電極表面を活性化しているためと言われている。²²⁾

IV. 中和熱の測定とプロトン解離平衡

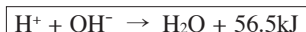
高校化学の教科書に記された「反応熱」の単元をみると，「燃焼熱」「溶解熱」「生成熱」は，各物質の値が例として表などで示されている。しかし，「中和熱」については，各物質の値の表はなく，その記述は2タイプに分けられる。

（なおアメリカの教科書²⁵⁾には「生成熱」「燃焼熱」「溶解熱」という用語はあるが「中和熱」の語句はみあたらない。）

I：酸（塩酸）と塩基（水酸化ナトリウム水溶液）の反応熱を中和熱として例示したもの^{10)～12)}



II：水素イオンと水酸化物イオンの反応熱を中和熱を定義したもの^{13)～15)}



それでは，塩酸と水酸化ナトリウム水溶液の中和熱は，濃度によってどのように変化するか。はたして「きわめてうすい強酸・強塩基」でない物質の中和熱はどうなるのだろうか。

ここでは，パソコンセンサーを活用した簡便な測定法により，「酸・塩基の反応熱」から「プロトン解離平衡」および「ヘスの法則」へつながる，発展的な探究の教材となることを示す。

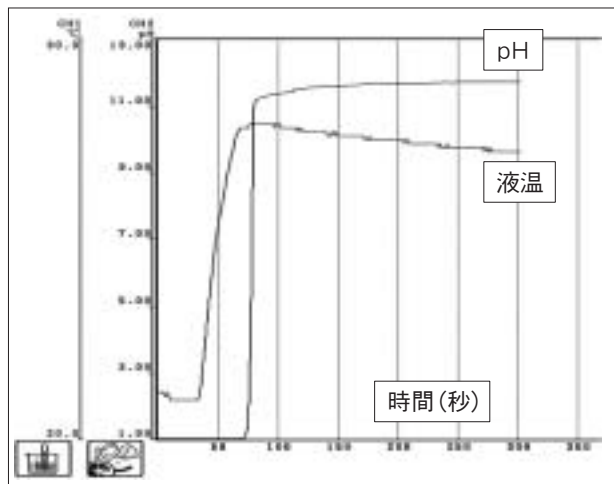
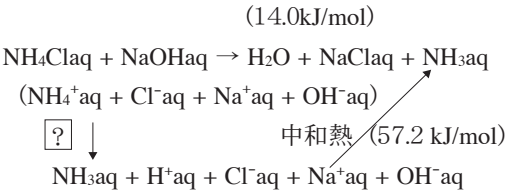


図3 センサーによる中和熱の測定記録例
(1 mol/l HCl(aq) 50ml + 1 mol/l NaOH(aq) 50ml)

測定の結果，中和反応による温度変化は，酸の濃度つまり塩基の濃度に比例し，測定した濃度範囲における塩

酸と水酸化ナトリウムとの中和熱を求めると、57.2 kJ/mol となり、文献値¹⁹⁾の56.4 kJ/mol とほぼ一致する。

同様に測定した塩酸とアンモニウム水との中和熱は46.0 kJ/mol、塩化アンモニウム溶液と水酸化ナトリウム溶液の反応熱は14.0 kJ/mol となるが、この反応熱は何かを、次のように考えることができる。



□は、アンモニウムイオンのプロトン解離反応の反応熱を表しており、プロトン解離定数 K_a を用いると、

$$\begin{aligned} \Delta G &= \Delta H - T\Delta S = -RT \ln K_a \\ &= -2.303 RT \log K_a = 2.303 RT pK_a \end{aligned}$$

よって、 ΔH の測定値と ΔS の文献値²⁶⁾を用いた計算により pK_a を求めることができる。

逆に pH の測定値から求めた pK_a の値を用いて、 ΔS を計算することができる。

つまり、 pK_a の値は、25℃で測定した塩化アンモニウム溶液の pH の値から、次式により求めることができる。

$$K_a = [\text{H}^+]^2 / (C - [\text{H}^+])$$

pH より求めたアンモニウムイオンの pK_a を無限希釈に内挿すると9.60 となり、25℃における pK_a の文献値¹⁹⁾²⁶⁾の9.25 とほぼ一致する。

同様にして、アミンと塩酸およびアミン塩酸塩と水酸化ナトリウム溶液の中和による発熱量と pH を測定すると、pH より求められるプロトン解離定数は、ジメチルアンモニウムイオン>メチルアンモニウムイオン>トリメ

チルアンモニウムイオン>アンモニウムイオンとなる。

一般に、メチル基は電子供与基であり、メチル基の数が増えるにしたがって、アミンの塩基性が強くなるはずである²⁷⁾。しかし、プロトン解離定数は予想される順にはならない。

気体状態ではトリメチルアミンはメチルアミンやジメチルアミンよりも塩基性が強いと確認されている²⁷⁾²⁸⁾が、溶液中で順序が異なる原因は、溶媒和の効果であると考えられる。文献²⁸⁾には、メチル基が増加するとアンモニウムイオンの水和エントロピーによる安定化が小さくなるためと説明されている。

V. おわりに

第2節に、溶解熱の測定に液温センサーを活用し、正確な液温の時間変化の測定から溶解熱を求め、単に発熱・吸熱だけで理解するのではなく、イオン結合の強さを反映した格子エンタルピー・溶解現象・水和イオンについて理解を深める教材として組み立てられることを示した。

第3節に、電気分解に応用して、電極反応の最適条件について考察した。電流センサー・電圧センサーによって可能となる連続的な変化を記録し、前処理なしに、正確なファラデー定数の決定が可能であることを示した。

第4節に、液温センサーとpHセンサーを組み合わせ、中和反応の反応熱・pH変化を同時に測定し、特に弱酸・弱塩基のプロトン解離平衡およびアミン類の塩基性に関する探究の教材として発展させた。

以上より、パソコンセンサーの特性を活かしたこれらの活動は、表1のように、教科書中で別々に学習する概

表1 パソコンセンサーの活用による化学的概念とその発展的内容

	溶 解 熱	電 気 分 解	中 和 熱
教科書で学習する概念	イオン結合 イオン結晶	イオン結晶 電解質	反応熱 発熱反応・吸熱反応 化学エネルギー ヘスの法則
	電離 電解質	酸化還元反応 イオン化傾向	強酸・強塩基 弱酸・弱塩基 電解質 電離度
	反応熱 発熱反応・吸熱反応 化学エネルギー ヘスの法則	ファラデーの法則 ファラデー定数 電気量	中和反応 pH 塩 滴定曲線
	水和 水和物	(物理分野) オームの法則 電流・電圧・抵抗	化学平衡 平衡定数
発展的内容	格子エンタルピー 水和エンタルピー 結晶水 (配位水・格子水) ランタノイドイオンの配位数の決定	電極反応の条件の最適化 (電極の面積・電極間の距離・ 電解質の濃度・電流・電圧) 電解質溶液の抵抗の働き 電極表面の前処理の意味	プロトン解離平衡 プロトン解離定数 エンタルピー エントロピー 自由エネルギー アミン類の塩基性の強さ

念を関連付けて扱いながら深く理解し、さらに生徒の興味・関心を高める教材であるとともに発展教材ともなりえると考えられる。

たとえば、イオン結合の強さをあらわす格子エンタルピーとイオンの水和による安定化（水和エンタルピー）によって、溶解熱が決まることなど、高校化学では個々の学習している内容（イオン結合・水和・溶解熱）が、相互に深く関係していることを理解できると考えられる。

参考文献およびホームページ

- 1) 文部科学省「新学習指導要領（平成10年度改訂）」, 1998年.
- 2) 文部科学省「新学習指導要領高校版（平成10年度改訂）」, 1999年.
- 3) 畠野弘通, 「化学と教育」40, 262, 1992年.
- 4) 水野博隆, 「化学と教育」40, 394, 1992年.
- 5) 馬場隆信, 「化学と教育」41, 15, 1993年.
- 6) 斉藤 清, 「化学と教育」42, 443, 1994年.
- 7) 児玉淳郎, 「化学と教育」42, 579, 1994年.
- 8) 吉川直和, 「化学と教育」43, 335, 1995年.
- 9) 吉川直和, 「化学と教育」45, 595, 1997年.
- 10) 「高等学校 化学I」三省堂, 2004年.
- 11) 「化学I」実教出版, 2004年.
- 12) 「高等学校 化学I」第一学習社, 2004年.
- 13) 「高等学校 化学I」啓林館, 2004年.
- 14) 「高等学校 化学I」数研出版, 2004年.
- 15) 「化学I」東京書籍, 2004年.
- 16) <http://www.suzukisoft.co.jp/>
- 17) 那須悦代, 喜多雅一, 村田勝夫, 「化学と教育」, 第52巻, pp.328-331, 2004年.
- 18) 新村陽一, 無機化学, 朝倉書店, 1984年.
- 19) 日本化学会編, 化学便覧基礎編II, 丸善, 1984年.
- 20) 那須悦代, ドラミニシフォ, 喜多雅一, 村田勝夫「化学と教育」, 第53巻, pp.102-105, 2005年.
- 21) 「高等学校 化学IB」数研出版, 2001年.
- 22) C. A. Seiglie, J. Chem. Ed., 30, 663-669, 2003年.
- 23) 岸田 功, 「化学と教育」50, 702-703, 2002年.
- 24) 玉虫怜太・高橋勝緒, 電気化学, 化学同人, 2000年.
- 25) Davis, Metcalfe, Williams, Castka, "MODERN CHEMISTRY" Holt Rinehart Winston, 2002年.
- 26) 大瀧仁志, 田中元治, 舟橋重信, 溶液反応の化学, 学会出版センター, 1997年.
- 27) 田中元治, 化学選書「酸と塩基」裳華房, 1983年.
- 28) 小林道夫, 岩波講座現代化学9「酸塩基と酸化還元」岩波書店, 1979年.