

ハンドヘルドテクノロジーとセンサーを活用した 高専における化学工学実験

Chemical Engineering Experiments Utilizing Handheld Technology
and Sensors at National College of Technology

梅 野 善 雄^{*1}
Yoshio UMENO

貝 原 巳樹雄^{*1}
Mikio KAIHARA

福 村 卓 也^{*1}
Takuya FUKUMURA

梁 川 甲 午^{*1}
Kogo YANAGAWA

長 田 光 正^{*1}
Mitsumasa OSADA

We conducted new chemical engineering experiments by using an algebraic calculator. The algebraic calculator is a handheld technology equipment. Data collecting equipment and variety sensors can be connected to the calculator. The recording method of experimental data could be changed from manual to automatic by the calculator. As a result, the complicated experimental procedure became simple and the experimental data range was expanded. In addition, the students were able to make new analytical or measurement instruments by themselves, combining both the algebraic calculator and the sensors. The introduction of the algebraic calculator could expand the content of chemical engineering experiments.

Keywords : Algebraic Calculator, Sensors, Chemical Engineering Experiments

キーワード : 数式処理電卓, センサー, 化学工学実験

1. はじめに

筆頭著者は、本誌で数式処理可能なグラフ電卓について何度か紹介し、工学教育における有用性について訴えてきた^{1), 2)}。特に、この電卓のオプションとして用意されているデータ収集器を利用すると、各種のセンサーを通して実データを収集して即座にグラフ化することができる³⁾。この機能は、高専や大学工学部など高等教育機関における工学実験でも十分に活用できると思われる、それにより新たな工学教育が可能になるのではないかと考える。

本校の物質化学工学科は、基本的には化学プラントの設計・運転のための化学技術者養成を目的とし、化学工学を基盤としたカリキュラムが構成されている。化学プラントの中では化学物質が次々に変化していく。その変化を辿るには複雑な計算が必要となるため、物質化学工学科では、平成17年度からそれまで使用してきたポケコンに代わり数式処理可能なグラフ電卓(TI-89Titanium⁴⁾)を購入させている。そして、幾つかの工学実験の中で、この電卓とセンサーとを組み合わせた実験を試行し始めた。

ここでは、その実験の概要について報告すると共に、この電卓を活用した新たな工学実験のあり方について考察する。

2. グラフ電卓の概要

この電卓には、数式処理ソフト「DERIVE」の簡易版が組み込まれ、微分方程式の解析解や線形代数の固有値計算、あるいは2変数関数のグラフ表示もできる。構造化言語(TI-BASIC)によるプログラミングも可能である。

また、オプション機器であるデータ収集器⁵⁾を利用すると、多数のセンサー⁶⁾を接続して簡単に実データを収集することができる。距離、速度、加速度、圧力、温度、光、pH、電圧など、50種類以上のセンサーが用意されている。精度も、通常の授業や実験で利用するには十分な精度をもっている。ただし、このセンサー群はこのオプション機器専用のセンサーである。市販されている汎用のセンサーを接続することはできない。データ収集の開始と終了を指示すれば、収集



図1 グラフ電卓

2012年11月28日受付

*1 一関工業高等専門学校

されたデータがリストデータとしてグラフ電卓に転送され、描画範囲が自動調整されてグラフ表示される。

3. 物質化学工学科の概要

本校の物質化学工学科は、昭和44年に全国高専の中で3校にだけ設置された化学工学科が前身である。当時の社会問題でもあった、化学工業の発展と公害対策の両方に対応できる技術者の養成が期待され、半世紀近くにわたり一千名以上の人材を世に送り出してきた。

平成7年には化学工学分野を学ぶ「プロセス工学コース」と、バイオ分野を学ぶ「生物工学コース」を併せ持つ物質化学工学科として改組され、4年次からはそれぞれのコースによる選択制となっている。

4年次の科目を下記に紹介する。括弧内は単位数である。卒業研究は4年次の後期から配置している。

【必修科目】

応用数学 (1), 微分方程式 (1), 応用物理Ⅱ (2), 情報処理 (2), 物理化学Ⅱ (2), 創成化学工学実験 (2), 物質化学工学実験実習 (3), 卒業研究 (1)

【選択必修科目】

化学プロセス工学Ⅰ (2), 無機材料工学 (2), 生化学Ⅰ (2), 生化学Ⅱ (2)

【選択科目】

基礎化学工学Ⅲ (2), 反応工学 (2), 機器分析 (1), 有機化学Ⅲ (1), 実践創造技術 (2), 化学プロセス工学Ⅱ (1), 微生物工学 (1)

なお、1～5年の実験・実習は次のように配置されている。5年における実験・実習は、コースによりプロセス工学と生物工学のいずれかを選択する。

【実験・実習科目】

- 1年：もの作り実験実習、基礎化学実験
- 2年：分析化学実験、無機化学実験
- 3年：有機化学実験、物理化学実験
- 4年：創成化学工学実験、物質化学工学実験実習
- 5年：プロセス工学実験実習・生物工学実験実習

4. センサーを利用した化学工学実験

物質化学工学科における学生実験のうち、3年、5年、そして専攻科における実験でこの電卓とセンサーとを組み合わせた実験を導入した。利用したのは、圧力、温度、塩素イオン、光、そして角度を測定するセンサーである。以下では、それぞれの実験の概要と学生の感想について紹介する。

4.1 温度と蒸気圧との関係

この実験は、温度と蒸気圧との関係を見るものであり、3年の物理化学実験で行われる。周知のように、熱力学によれば平衡物理量は温度の上昇とともに上昇する。その上昇の仕方は、広い温度範囲で見ると直線的な上昇ではなく右上がりの曲線になる。物理化学実験では、温度と溶解度や温度と反応速度など、この関

係性を徹底的に身につけさせようとする。

一般に、蒸気圧(P)と温度(t)との関係はアントワン式と呼ばれ、 $\log_{10}P = A - B/(t+C)$ で表される。A, B, Cはアントワン定数と呼ばれ物質により異なる値をとる。

この実験を、従来は上部を閉じた比較的大型の瓶を直接加熱して蒸気を発生させ、その蒸気圧を水銀を封入したU字管マンオメータで目視観測してきた(図2)。この方式は、瓶全体を均一に加熱することが難しく、測定した圧力がアントワン式の圧力よりも低くなる傾向があった。また、水銀マンオメータの長さの関係上、40℃程度までのデータしか取ることができず、その温度を超えると圧力が大きくなって水銀がU字管からトラップに流出するなどの問題があった。

そこで、棒状温度計を温度センサーに、U字管マンオメータを圧力センサーに置き換えて実験を行った(図3)。温度センサーの測定範囲は-40～135℃であり、精度は0～40℃の範囲では0.03℃、40～100℃の範囲では0.1℃である。また、ガス圧力センサーの測定範囲は0～210kPaであり、精度は0.05kPaである。

実験は、小型のガラス瓶内をポンプを用いて真空状態にし、そこへエタノールまたはメタノールの液を入れてドライヤーで加熱する。そして、温度とガラス瓶内の蒸気圧をセンサーを用いて測定した。センサーを利用することで実験装置が小型化された。また、水銀流出の心配をする必要がないので加熱できる温度範囲が広がり、アントワン式へのあてはまりも良く適切な温度・蒸気圧曲線を得ることができた。

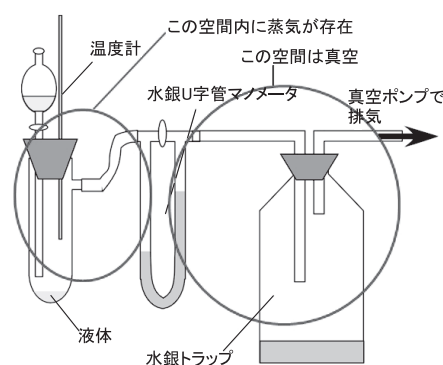


図2 蒸気圧測定に関する従来の実験装置

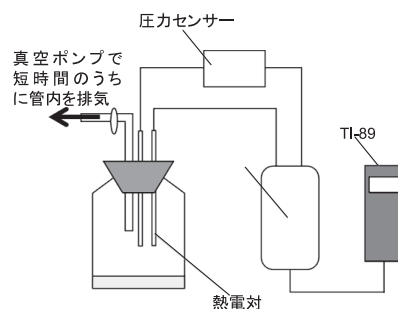


図3 CBL2利用による蒸気圧測定実験装置

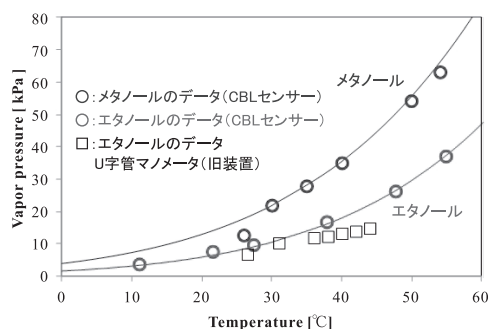


図4 丁寧な実験をしたグループの測定結果

図4は、丁寧に落ち着いて実験を行ったグループの結果である。メタノールとエタノールの2つの物質について実験をして、いずれもアントワン式によくあてはまる結果を得ている。従来の方法では60℃まで熱することはできなかったが、センサーを利用することで加熱できる範囲を広げることができた。比較のため、従来の方法でも実験をさせた。□記号は、エタノールに関する図2による従来型の実験方法で得たデータである。曲線ではなく直線的なデータになっている。おそらくは容器上部に蒸気が凝縮するためと考えられる。

学生の主な感想は、以下のようなものである。

- 精度の高いデータを得るにはセンサーを用いた方が良いと考える。人間の目で温度計やマンノメータの圧力差を読むのは誤差が生じやすい。
- TI-89は精度が高いデータが得られる。旧装置はU字管マンノメータを用いるため、圧力の変化が感覚的に分かることがメリットと考える。
- 表記が英語であるため方法を覚えるのに時間がかかるが、操作に慣れてしまえばCBLを利用した方がよいと考える。
- 英語表記のため慣れるのに時間がかかる。また、トラブルが起きた場合の対処に時間がかかる。

実験担当教員は、当初は圧力センサーがうまく機能するかどうか半信半疑であった。しかし、実験結果はアントワン式の推算結果と良好に一致した。このセンサーにはある程度の信頼性があることを実感し、電圧計、電圧計、電気伝導度計などを導入した実験テーマに内容を改善していきたいとの感想をもった。また、圧力を実感しやすい従来のU字管マンノメータでの圧力測定も併せて実施していく必要があると述べている。

学生がもっとも困難を感じたのは、グラフ電卓のメニューがすべて英語表示であることである。途中でトラブルが生じると解決にかなりの困難を伴う傾向があるが、学生達はグループで力を合わせて英語を理解しながら操作していった。そのようなトラブル体験は、就職後の製造現場で海外製品を取り扱う場合にも生かされたいと思われ、指導教員はあえて手を差し伸べることなく学生が自分たちで解決するように仕向けた。

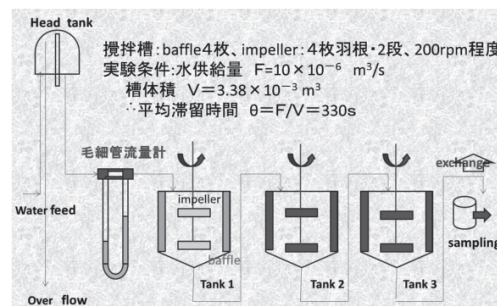


図5 連続攪拌槽の残余濃度実験装置

4.2 連続攪拌槽の残余濃度の測定

この実験は、連続攪拌槽の残余濃度を測定する実験であり、5年のプロセス工学実験において行われる。この実験の目的は、化学プラントにおける反応器の性質として完全混合流れについて理解させようとするものである。周知のように、完全混合流れとは、濃度が異なる流体が流れ込むと槽全体が瞬間的に攪拌混合されて均一濃度になり、槽から出る流れの濃度は常に槽内の濃度に等しい流れをいう。

図5は、実験装置の概要である。この装置は、容積約 $3.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ の透明アクリル樹脂製の容器3槽をチューブで直列に連結したものである。

これらの槽に同一濃度のチオ硫酸ナトリウム($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)水溶液を満たし、図5の左端のヘッドタンク(定水位槽)から約 $1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ の一定流量で水道水を供給するとき、右端の槽から出るチオ硫酸ナトリウム溶液の濃度低下を測定するものである。

従来は、右端の槽から流出する水溶液をホールピペットを用いて正確に5cc採取し、これにビュレットからヨウ素溶液を滴下する。そして、反応式



の完結に要するヨウ素の滴定量をデンプン指示薬の呈色の変化から読み取る。この操作を、2分間隔にサンプリングして滴定量が最初の1/20になるまで繰り返して濃度の変化を求めていた。煩雑で時間を要する実験である。滴定回数が40回程度にもなって時間通りには終わらない場合もあった。

そこで、濃度変化を自動測定するために、溶液をチオ硫酸ナトリウムから食塩に変え、水道水の代わりにイオン交換水を供給し、塩素イオンセンサーを利用して濃度を自動測定する形に変更した。食塩は安価であり、水に溶解すると濃度によらずほぼ100%電離して塩素イオンを生成する。毒物であるヨウ素を使わずに済むのもメリットである。塩素イオンセンサーは、電圧(E)の変化により濃度(C)を $C[\text{ppm}] = A \times B^E$ により判定する。実験を始める前に、定数A, Bを1000ppmと10ppmの2液を用いてあらかじめ決定しておく必要がある。このセンサーで測定できる範囲は1.8~35,500ppmである。pH範囲は2~12、温度範囲は0~

50℃の範囲で測定できる。

実際の実験では、測定データはグラフ電卓側に自動的に転送され、液晶画面にリアルタイムで表示される。この仕組みは、工場での工業計測と同じものである。また、自動計測することにより、長時間の測定も可能になる。

図6は、1～3槽の場合の濃度低下の測定結果と理論値とを比較したものである。測定値は、比較的よく理論値と一致している。従来の測定方法と比較しても変わらない精度である。

また、1槽単独の場合は単に指数関数的に減少するだけであるが、2槽連続、3槽連続と槽の数が増えると、最初はほぼ初期濃度と同じ時間帯が生じ、濃度低下もゆったりするという特徴的な変化も測定できている。

センサーを利用することで、2分間隔にサンプリングして滴定する作業が不要になり、2日に分けて行っていた実験が1日ですむようになった。また、空いた時間を利用して流量や攪拌の仕方を変えてみるなどの自由な実験をする時間が生まれた。非常に余裕をもって実験を行うことができるようになった。

デメリットとしては、水道水の代わりに塩素イオンを含まないイオン交換水を全体で $9 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ 程度必要とすることである。また、学生がこのような実験に慣れていないこともあり、操作の面でやや苦労したグループが見られた。しかし、センサーを利用して測定を自動化することは、もの作りの現場における計測・制御を疑似体験することにもなるので、このような実験を体験させることのメリットは大きいと考えられる。

多様なセンサーがあるので、圧力などの時間により変化する現象の実験にも利用できる。機器に不慣れな部分は、いろいろな実験テーマでこの手法を使うことにより解消されていくものと考えられる。

4.3 粉末の粒度分布の測定

この実験は、物質化学工学専攻の専攻科1年生（4名）の特別実験として行われた。与えられた実験テーマに対して、その目的を達成するにはどのような実験を行うべきかを検討させる。そして、具体的な実験装

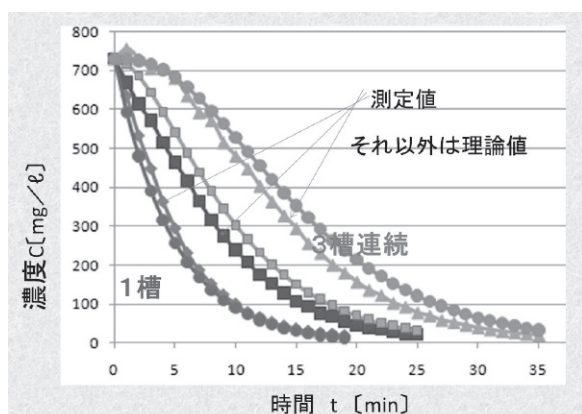


図6 センサーによる残余濃度の測定値と解析解

置の組立て段階から考察させて実験が行われる。

学生に与えたテーマは、粉末の粒度分布に関する簡便な測定方法を考案することである。従来、粉末の粒度分布は、それを水などの溶媒に分散させてレーザーを照射する。粒子に光を照射すると粒子径により散乱光量やパターンが異なるので、それを測定することにより粒度の大きさを推定する方式が一般的である。しかし、この方法では水に溶ける粉末は測定できないので、試料と溶媒の組み合わせを検討する必要がある。

そこで、溶媒に分散させないで、粉末のまま粒度分布に関する情報を取得する方法について開発することを実験目標とした。その際、グラフ電卓のオプション機器であるCBL2を利用すると、様々なセンサーを接続して容易にデータを取得できること、また、簡易なレーザー光としてレーザーポインターが使用できること、センサーとしては光センサーと角度センサーが利用できることを伝え、これらの機器を利用して実験装置を考案するよう指示した。

学生達は、まず、このような測定は通常どのように行われているか等の文献調査を手分けして行った。そして、レーザーを照射すると、粒子の大きさにより散乱光量にパターンの違いがあり、角度依存性があることを確認した。実際、粒子径が大きいほど全周方向に散乱強度が強く、特に前方への散乱強度が強い。一方、粒子径が小さくなるにつれ全体的に散乱強度が弱まり、前方散乱光も弱まることが知られている。

学生達は、以上のことを踏まえた上で、与えられた機器でどのような実験を行うべきかを検討した。

まず、与えられた機器で粒子の大きさによる角度依存性を測定できるかどうかを確かめるため、次のような装置を考案した。

- (1)レーザーポインターを固定する。
- (2)その先に試料を置いてレーザーポインターと一緒に回転させ、ロータリーモーションセンサーで角度を測定する。
- (3)外部に固定した光センサーで、回転する試料からの散乱光量を測定する。

図7は、学生達が作製した装置である。右側がレーザーポインター、中央に試料を置いて一緒に回転させ

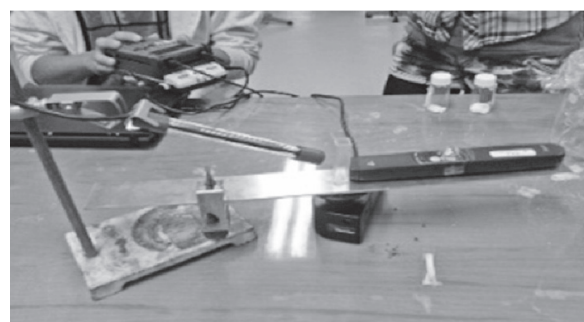


図7 学生達が作製した装置

る。散乱光量は左側に固定された光センサーで検出する。下部にはロータリーモーションセンサーがあり、回転角を検出する。使用したレーザーポインターの出力は1 mW、波長は635nm（赤色光）である。光センサーの感度は0～600luxのモードを利用した。

これにより、角度と散乱光量の2つのデータが同時に取得される。CBL2は複数のセンサーを接続して、それらのセンサーからのデータを同時に取得することができる。角度は0°～360°が0～1の値として測定される。データ取得後は描画範囲が自動的に最適化され、2つのデータの関連性がグラフ表示される。

実際の実験では、試料として砂粒とカニキチン粉末を使用し、それらの角度依存性を測定した。砂粒は篩にかけてサイズ（mm）別に、0.59以下、0.84～1.64、1.68～2.00、そして2.00以上の4種類に分類した。キチン粉末はコンバージミル（800rpm）で粉碎し、20min粉碎と120min粉碎の2種類のサイズを用意した。

図8と図9は、その測定結果である。砂粒とキチン粉末の違いについては明らかな差異がみられる。砂粒については、サイズの大きさによる差異がある程度現れており、粒子径が大きいほど散乱光量が強く、特に前方への散乱強度が強い傾向が読み取れる。

溶媒に分散させないことから、同種試料の粒度別のグループ間の差異が明瞭に判別できたとは言えないが、粒度が大きいほど前方散乱強度が増大する傾向、あるいはその逆の傾向が見られることは確認される。粒子を1層とするなどの工夫を加えれば、さらなる可能性が示唆される。

以下に、この実験を行った学生の感想を紹介する。

- 初めは、こんなレーザーポインターでは測定なんて絶対できないと思っていました。こんなので出来るのだったら、普通使っているような分析装置はいらないと思っていたけど、やってみると簡易な装置でもそれなりの結果が出て驚きました。
- 数式処理電卓とセンサーとを積極利用した場合、これらを使った実験方法が研究されしっかりと確立されれば、これまで費用が高くていた分析などを手軽に行うことができ、コストの大幅な削減を行うことができると思う。現在の分析などは大型で操作

が難しいものが多いが、小型で簡易な実験装置が増えれば工学実験のあり方も変わってくると思う。

- 従来の装置ではできないという思い込みを捨てて、実験方法などを工夫してやってみようと思いました。これまでやったことのない、装置を開発するというような実験で楽しかったです。

5. グラフ電卓の利用で可能となる化学工学実験

一関高専の物質化学工学科におけるグラフ電卓とセンサーを利用した学生実験の概要を紹介してきた。一部の実験テーマでの利用にしか過ぎないが、センサーを利用することにより実際の工場と類似した形でデータが採取され、煩雑な単純作業が省力化されて短時間でデータを採取することができた。データの取得範囲も拡大することができる。水銀やヨウ素などの毒物を使わなくて済むのも大きな利点である。

グラフ電卓とセンサーの利用は、単に従来の測定機器をセンサーに置き換えただけの効果ではない。化学系の実験教育において、これらの機器の利用には以下のような大きな可能性が秘められていると考える。

5.1 反応・プロセス変化の可視化

これまで、平衡や過渡現象などは目視に頼っていたといえる。しかし、センサーを利用することで、このような反応やプロセスの時間的変化が数値で記録されてグラフ表示される。途中の変化をより意識させることができ、変化の「見える化」に有効といえる。時間変化による記録が残ることにより、何がどのように変化しているのかを実験後に細かく分析することができる。いろいろな条件を変えて実験させれば、その変化を特徴づけている原因が何であるかを究明させることも可能となる。

5.2 「実験づくり」での利用

本校では、「実験をつくる」科目として、4年次に創成化学工学実験⁷⁾を設置している。学生の工夫による実験を行わせると、最初は必ず失敗をする。しかし、その実験のいろいろな条件を振り返らせることで、学生は実験の意味をより深く理解できるようになる。この実験ではまだセンサーは使われていないが、多様なセンサーを活用させることで、学生の自由な発想でい

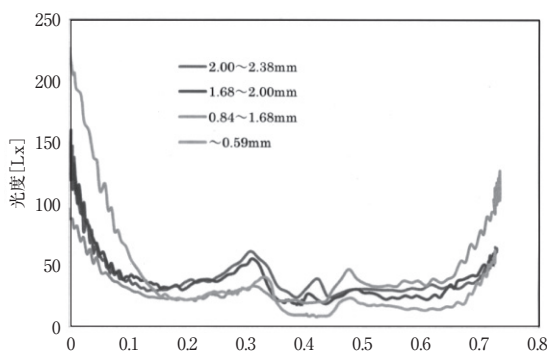


図8 砂粒の散乱光強度の角度依存性

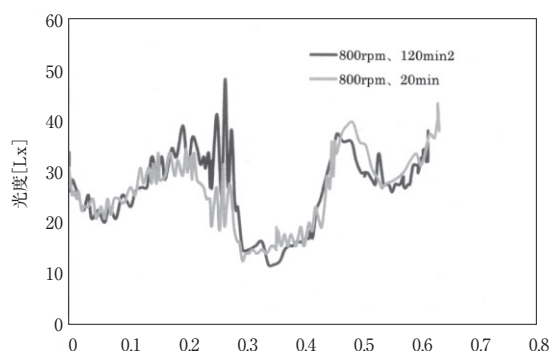


図9 キチン粉末の散乱光強度による角度依存性

ろいろな実験づくりが可能になると期待される。

たとえば、酸素を液体に溶かす基本的な現象を考える。液体中の酸素濃度は溶存酸素計により測定できる。このセンサーを利用することで、時間変化にともない酸素がどのように溶けていくのか、溶ける速度を速めるにはどのようにすれば良いのか、酸素濃度はどこまで高めることができるのか、圧力や温度を変えると溶ける速さがどのように変化するか等々の実験を、簡単に実現することができる。いろいろな条件を変えながら試行錯誤的に実験することで、学生が何らかの基本原理への気づきを得る可能性もある。

5.3 分析・測定機器の試作と小型化

物質化学工学科には、ガスクロマトグラフ質量分析計や赤外分光計など多数の分析機器がある。そこで得られた分析結果を解釈する上では、これらの分析機器の仕組みも同時に理解しておく必要がある。その意味で、グラフ電卓と多様なセンサーを組み合わせ、分析機器そのものを基本原理に基づいて学生に試作させることは有意義である。データ収集器は同時に複数のセンサーを接続してデータを取得できるので、いろいろな分析・測定機器を学生に試作させることや、小型化を検討させることも十分に可能と考える。

実際、簡易な機器を組み合わせるだけで、粉体の粒度分布についてある程度のデータを測定することができた。どのような方法でデータを取得するかを検討する過程は、その現象の基本原理の確認をさせることになる。そのような装置の作製には広範な専門分野の知識が必要である。工業技術者として、特定の分野だけの知識だけでは不十分であることを実感させることにもなる。また、測定方法に関する検討過程からは、従来とは全く異なる新しい測定方法が提案される可能性もあり、場合によっては実用化可能な簡易測定器の開発に繋がることも期待される。

5.4 エンジニアリング・デザイン教育

工学教育の最終場面では、学生は自らの創意工夫を加えて何らかの創造性のあるものを作り上げることが求められる。そのような創意工夫の発端は、まず何かに気づくことである。次に、その気づきをもとに速やかに実験等を行って試してみることである。

「このような場合はどうなるか？」という疑問を、実験や計算で一つ一つ確認する作業を積み重ねることになるが、化学系の場合、その実験で何がどのように変化するかを調べるための設定はそう簡単ではない。しかし、グラフ電卓と多様なセンサーを組み合わせることで、それを容易に実現できると考える。理論計算が必要な場合であっても、数式処理機能やグラフ機能を利用すれば思考を途切れさせることがない。

機械系や電気情報系では、それまでに学んだ知識・技術をもとに自由に設計させる実験がある。化学系に

おいても、低学年でセンサーの有用性と物理現象の正しい理解を得させ、座学で主要な数式処理機能やグラフ機能の使い方を修得させておけば、高学年や専攻科で自由な発想による実験が可能になると考える。自由な発想をいかにして具現化するかが重要である。グラフ電卓は、その具現化の敷居を大きく引き下げる、いわばエンジニアリング・デザイン教育において触媒のような働きをするのではないかと考えられる。

6. おわりに

グラフ電卓をセンサーと組み合わせて幾つかの実験で利用することにより、以上のような結果を得た。これらの機器を利用することで、前節で述べたように、化学工学実験の内容を大きく広げられる可能性がある。今後も、さらにいろいろな可能性について試していきたい。

なお、本研究は、JSPS科学研究費 22500830の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 梅野善雄：数式処理電卓は工学教育に何をもたらすか？, 工学教育, 48-4, pp.9-15, 2000
- 2) 梅野善雄：数式処理電卓を最大限活かした工学教育の可能性, 工学教育, 58-2, pp.2-7, 2010
- 3) 梅野善雄：工学教育における数式処理電卓の利用例－実データの収集と解析－, 平成14年度工学・工業教育講演会講演論文集, pp.83-86, 2002
- 4) TI-89titanium, http://www.naoco.com/calc/ti-89t_summary.htm, 参照日：2012-11-1
- 5) データ収集器CBL2, http://www.naoco.com/data/cbl2_summary.htm, 参照日：2012-11-1
- 6) CBL2で利用できるセンサー, Webページ, <http://www.vernier.com/products/sensors/>, 参照日：2012-11-1
- 7) 梁川甲午, 福村卓也, 佐藤和久, 他11名：学生による化学工学実験づくりによる実践的・創造的技術者教育の試行, 論文集「高専教育」, 33, pp.275-280, 2010

.....

著 者 紹 介



梅野 善雄

1974年、東北大学大学院理学研究科修士課程修了。

現在、一関工業高等専門学校一般教科教授。テクノロジーを活用した数学教育の研究に従事。日本数学教育学会、日本工学教育協会などに所属。

2001年、日本工学教育協会賞（論文論説賞）受賞