

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：51201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25560093

研究課題名(和文)ハンドヘルドテクノロジーを分析・表示装置とする近赤外線分光器の教育キットの開発

研究課題名(英文)Development of the Near-Infrared Spectrometer as an Education Kit, of which the Analysis and Display Device is the Graphing Calculator, as a Handheld Technology

研究代表者

梅野 善雄 (Umeno, Yoshio)

一関工業高等専門学校・教授

研究者番号：30042211

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ハンドヘルドテクノロジーとしてグラフ電卓(TI-NSpire)を分析・表示装置とする近赤外線分光器の教育キットを開発した。光源にはハロゲン電球を用い、回折格子の回転はステッピングモーターにより行いArduinoで制御した。Pbs光センサーからの信号増幅はロック・イン・アンプ(自作)により行い、ステッピングモーターの回転とグラフ電卓に接続したセンサーによるデータ収集開始の同期は外部スイッチ(タクトスイッチ)により行った。本装置を用いた学生モニター実験を計4回行い、装置の改良点や教育上の活用方法等について多くの有益な指摘がなされた。さらに改良を推し進めたい。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed the Near-Infrared Spectrometer as an education kit, of which the analysis and display device is the graphing calculator (TI-NSpire), as a handheld technology. We used a halogen lamp as a light source, a stepping motor as a fine rotator of the diffraction grating controlled by the Arduino. Much more, the amplifying the obtained signal taken by the PbS light sensor was done by the special amplifier, lock-in Amplifier (Fabricated by ourselves). Synchronization of both the starting of data collection and the rotation of the diffraction grating is carried out by an external switch (tact switch). We did students monitor experiments using this fabricated device for the purpose of taking the improving points on the equipments and comments for the way of the educational utilization, totally four times.

研究分野：科学教育

キーワード：工学教育 近赤外線分光器 グラフ電卓 教育キット

1. 研究開始当初の背景

本経費による研究代表者の研究(課題番号:22500830)では、ハンドヘルドテクノロジーとして数式処理可能なグラフ電卓を取り上げ、オプションで用意される各種のセンサーを組合わせて高専の工学実験で活用した。幾つかの実験で利用すると、「手作業による単純なデータ収集が自動化でき、実験の本質により迫る作業が可能になる」、「既存の方法よりも広い範囲のデータ収集が可能になり、理論曲線への当てはまりが良くなる」などの効果が参加学生にみられた。

さらに、グラフ電卓とデータ収集器(光センサーと角度センサーを利用)を用いて、光の散乱状態による粒度の大きさを測定する実験装置の考案・組立てを学生に行わせると、精度は劣るものの粒度の大きさに明確な差が検出された。実験を行った学生(専攻科生)は、「こんな簡便な装置でもっともらしい結果が出ることに驚いた。高価な装置を使う必要はないのではないか。」との感想を書いている。

以上の背景のもとに、今後の展開として次のような感想と着想を得た。

- 既存の分析・計測装置の簡易版を作製させることにより、基本原理の理解を学生に定着させ、そのような装置には多方面の分野の知識が使われていることを実感させることができる。
- 汎用のセンサーで収集したデータをグラフ電卓で処理・分析して結果を表示することができれば、その分析・計測装置の小型の簡易版を作製できる可能性がある。
- 作製に関する検討の中では、学生の既存知識にとらわれない自由な発想により、新たな計測・測定方法が提案されてくることも期待した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、成分分析や品質管理など多くの分野で使用されている近赤外分光器を、ハンドヘルドテクノロジーとして市販のグラフ電卓を利用した教育キットとして開発することにある。このキットを用いた装置の組み立てや調整を通して、分析や計測の背後にある基本原理に対する理解の深化を図る。そして、実用されている分析装置は多くの専門分野の知識が一体となって作製されていることを体験させる。このようにして異分野の知識を統合してできあがる「もの作り」のセンスを身につけさせることにより、学生に工業技術者としての基礎を固め

させる。これは、学校教育現場のみならず、製造現場で働く社会人教育でも有益と考えられる。

多数の分析装置の中から近赤外分光器を取り上げたのは、次の2つの理由による。

- (1) この機器は非常に多方面で利用され、分光関連の機器ではオーソドックスな装置である。
- (2) 分担研究者の貝原は、当経費による研究(課題番号:21560854)で、市販のモノクロメーターとパソコンを利用して近赤外分光器の小型化にある程度成功している。パソコンによるデータ表示・解析部分をグラフ電卓に切り替えることで、本研究の実現可能性が高いと判断された。

この分光器をグラフ電卓を利用した教育キットとして実現できれば、他の汎用のセンサーを利用して分光器以外の様々な分析機器も教育キット化できる可能性がある。さらには、本研究の成果はいろいろな分析・測定機器の小型化に繋がる可能性もある。

3. 研究の方法

研究は、以下の事項についての開発・検討を推し進めることにより行った。

- (1) 光センサーとグラフ電卓とのインターフェースの開発:光センサーは汎用のセンサー(PbS光導電素子 P9217, 感度波長:1~2.9 μm)を使用した。グラフ電卓はテキサスインスツルメント社の TI-Nspire CX CAS である。
- (2) データ解析とグラフ表示のためのグラフ電卓のプログラム開発:グラフ電卓では、BASICライクの構造化言語によるプログラミングが可能であることから、プログラミング作業に大きな困難はないと判断した。
- (3) モノクロメーターの開発:分光器を作製するには、まず光を分散させて特定の波長の単色光を得る必要がある。このための装置、いわゆるモノクロメーターは市販で10万円以上の価格帯である。モノクロメーターの構造自体は単純であることから、サイズのコンパクト性にこだわらなければ十分に自作可能と判断した。これが自作できれば、キットの作製価格を大幅に引き下げられる。
- (4) 近赤外分光器の開発:(1)~(3)の開発が終了した後、モノクロメーター、PbS光センサー、およびグラフ電卓を組み合わせた近赤外分光器を試作した。
- (5) 学生によるモニター実験:試作品が完成した段階で、学生によるモニター実験を行い、その教育効果を検証した。

- (6) 教育キットとするための検討会: 以上の結果もとに、教育キットとしての改善点や効果的な利用方法等に関する検討会を開催した。

4. 研究成果

前節で述べたように、分担研究者の貝原の研究により、パソコン制御による小型化近赤外分光器の開発がある程度なされている。その主な構造は、光源、モノクロメーター、微弱信号を高いSN比で検出するための光チョッパー、PbS光センサー、光チョッパーと同期した信号のみを検出するためのノッチフィルター、同期信号と検出信号の乗算器、および増幅回路である。検出された信号は半波整流のための位相調整を経て、最終的には直流信号として出力される。

モノクロメーター中の回折格子の回転とステップモーターにより高精度回転制御することにより、波長を掃引しながら信号を得る。試料無しの場合の信号に対する試料有りの場合の信号比の対数に -1 をかけることで試料の吸光度が得られる。最終的には、横軸が波長、縦軸が吸光度のスペクトルとなる。また、測定の開始・終了、あるいは回折格子の初期位置への復帰などは、Visual-Basicにより制御する。

本研究は、以上の分光器のデータ表示やデータ分析をグラフ電卓で行うことによりさらなる小型化を図り、それを教育キット化しようとするものである。そのため以下の事を行った。

(1) PbS光センサーとグラフ電卓とのインターフェースの開発

研究分担者の川谷は、グラフ電卓の旧型機Voyage200に対して、外部機器との通信手順を解析してマイコンと接続した実績がある。本研究で使用したグラフ電卓はUSBプロトコルを採用しているが、その通信手順の解析はVoyage200の比ではなく非常に難解であった。

限られた研究期間でプロトコル解析だけに多くの時間をかけるわけにはいかないことから、改善の策として、PbS光センサーの電圧変化をグラフ電卓に接続できる電圧センサーで読み取ることとした。グラフ電卓の周辺機器Easy Linkを利用することにより、電圧変化は正常に読み取られ、さらにグラフ電卓の標準機能を利用してグラフ表示やデータ分析等も容易であった。

しかしながら、電圧信号の取り込みは近赤外分光器の回折格子の回転と連動させる必要があった。4.1で詳述するが、本研究の分光器はマイコンArduinoにより制御されている。ここで、グラフ電卓の周辺機器のうち、複数のセンサー

からのデータ入力やトリガー設定の可能なLabCradleに注目した。LabCradleは2chのアナログデータを入力でき、いずれかのチャンネルにトリガーを設定できる。1chはPbS光センサーの電圧出力を取り込むために利用し、残る1chはArduinoのデジタル出力端子から出力されるトリガー信号の受信に利用した。これにより、回折格子が回転すると同時にグラフ電卓でPbS光センサーの電圧出力を得ることができた。

ただし、LabCradleの価格はグラフ電卓よりも若干高額であり、単にトリガーのためだけに利用するのは極めて非効率的である。そこで、外部スイッチ(タクトスイッチ)をArduinoに取り付け、外部スイッチの切り替えをグラフ電卓によるデータ取得開始のキー押下と同時に行うことにより、回折格子の回転と連動したPbS光センサーの電圧信号を取得した。

(2) データ解析とグラフ表示のためのグラフ電卓のプログラム開発

使用したグラフ電卓は、非常に高機能な数式処理機能を持つ。取得したデータはリスト形式で保存され、グラフ化やいろいろなデータ分析も幾つかのキー操作だけで可能である。

当初は一連の流れをプログラム化しようと考えたが、本研究は「教育キットの開発」であることから、全てをプログラムで自動化してしまうことは教育効果の上で問題があると考えた。そこで、実験実施者がグラフ化やデータ解析をグラフ電卓のキー操作により自分で行うことにし、そのためのグラフ電卓の操作マニュアルを用意することにした。

(3) モノクロメーターの開発

貝原の試作した分光器では、optometrics社のモノクロメーター(MC1-06)を使用している。これは850nmから2200nmの近赤外光を分光できるモノクロメーターであり、サインバー方式で回折格子を精密に回転することにより、約7回転半で850nmから2200nmの波長領域を掃引できる。また、平面回折ミラーに凹面反射鏡を組み合わせて、通常の光路長よりも短い距離で高分解モノクロメーターを実現している。

本研究で使用するモノクロメーターの開発では、このMC1-06の相当品の試作を検討した。必要な凹面鏡の加工は本研究費で十分に対応可能であったが、一方では分光器としての性能を高めるため、低ノイズ化や高速測定化の実現等の検討も必要である。限られた期間内での研究の優先順位を考え、まず教育キットとして完成

させることを優先し、研究期間内でのモノクロメーターの試作は断念した。

ただし、MC1-06の凹面鏡部分を平面鏡に置き換えた実験をすることで、凹面鏡と平面鏡の2つの方式で測定したスペクトルを比較させることができ、光路の長短と分解能の性能の違いを学生に実感させることができる。モノクロメーターは研究期間終了後に自作予定である。

(4) 近赤外分光器の開発

本研究では、貝原の試作した近赤外分光器に対して、(4.1)~(4.3)の改良を加えた。

(4.1) Arduinoによる制御プログラムの作成

分光器のパソコン制御部分を、オープンハードウェアであるArduino Unoによる制御に変更した。これにより、Arduinoに制御プログラムを転送するときを除けば、グラフ電卓と外部スイッチのみで分光測定が可能になり、パソコンを介在させる必要は無い。

Arduinoは、具体的には、ステッピングモーターの回転方向とステップ数を制御することによる回折格子の角度制御、PbS光センサーからの出力値のサンプリング、およびその出力値のデータ出力を制御した。

作製した分光計測システムの概略図を図1に示す。測定の開始信号は外部スイッチ(タクトスイッチ)により取得可能とし、外部スイッチからのパルス信号を受けて、その後に予め設定しておいたステップ数のステッピングモーターの回転が始まる。必要な回数だけ回転すると、逆回転して元の位置に戻って停止し、再測定が可能となるようにした。

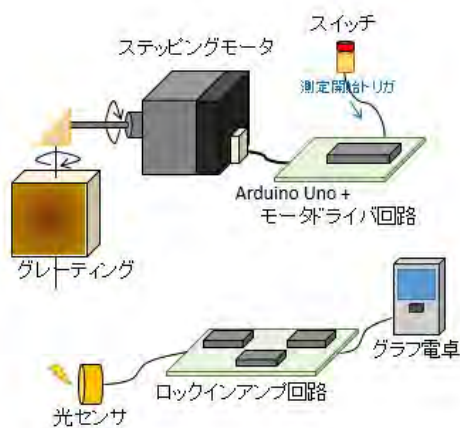


図1：分光計測システムの概略図

(4.2) ロック・イン・アンプの性能改善

近赤外分光器では、モノクロメーターにより得られた単色光をPbS光センサーにより検出するが、それは雑音の混じった微弱信号である。そ

こで、周期的微弱信号処理機器であるロック・イン・アンプ(LIA)を利用したモジュレーション方法を採用した。モジュレーション周波数が高いほどSN比が向上する。

しかし、近赤外領域でよく利用されるPbS光センサーは、その周波数特性が一般的な光電管と比較すると極めて低く1kHz以下である。そこで、本システムではモジュレーション周波数を限界周波数に近い500Hzに固定し、SN比の改善のためにバンド・パス・フィルター(BPF)を2段から4段に増設した。これにより、BPFの通過周波数の半値幅が約500Hz以上から約300Hz以下となり、フィルターとしての性能が2倍に向上した。

(4.3) ハード部全般の改善

本装置を教育キット化とするため、ハード部分全般にわたり以下のような改良を加えた。

①当初は供給電源として3つのAC/DCアダプターを使用していたが、これを+12V出力のAC/DCアダプター1個で済むように電源系の簡素化を図った。この電源からの供給先は、光源であるハロゲンランプ、波長送り用のステッピングモーター、測定光のモジュレーションするための直流モーター、LIA、PbS光センサー、そして、光チョッパーである。さらに、幾つかの必要な直流電源回路を1つの基板にまとめ、回路自体を簡素化した。

②ハロゲン光源、分光器、光学駆動回路および信号処理回路等を一体化し、シャーシ(43×10×23cm)に収めてシステムの更なる小型化を行った。また、シャーシのフロントパネルには、LIA調整用のつまみ、スイッチ、モニター用オシロスコープとの接続用端子類を配置して、操作性の向上を図った。本システムの電子回路部のブロック図を図2に示す。

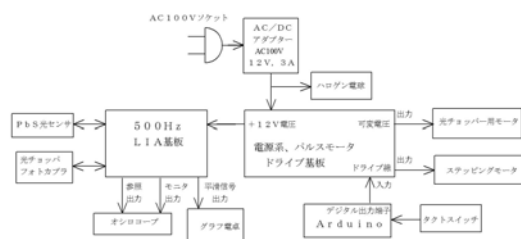


図2：電子回路部のブロック図

(4.4) 動作イメージ

以上の開発により、本システムは以下のような形で動作する。

最初にシステムの電源をオンにすると、ハロゲン電球が点灯し、光チョッパーセクターが回転

し始める。Arduino もプログラムの実行を開始し、外部スイッチが押されるのを待つ状態となる。外部スイッチを押すとステッピングモーターが駆動し始め、分光器の波長送りが開始され予定した波長まで自動測定を行う。得られた分光スペクトルはグラフ電卓に表示される。予定波長まで測定を行うと、ステッピングモーターは逆回転して分光器の波長は自動的に測定開始時の波長に戻る。本システムは測定後、再測定可能状態に自動で戻るため、測定は繰り返し行うことができる。

(5) 学生によるモニター実験

ある程度システムが完成し分光測定が可能になった段階で、学生によるモニター実験を2回ずつ2期に分けて行った。この実験の目的は、原理解説と光学調整、電子回路調整、および測定実験を実施して、装置の理解と活用方法、および教育効果を極大化するための改良箇所を明確化することである。

○第1期：平成26年9月27日(土)～28日(日)

実験の概要を示して学生を募ったところ、4名の学生から応募があった。分光器関連の卒業研究をしている制御情報工学科の5年生と、他は物質化学工学科の本科生と専攻科生である。初日は専攻科生2名、2日目は本科生2名(4年・5年)にグループ分けをして実験を行った。両日とも、実験後の検討会も含めて12:30～18:00の時間帯に実施した。

この期の実験では、まだ回折格子の回転とグラフ電卓によるデータ収集開始とを連動させる方法が確立されていなかった。そこで、それぞれの開始キーを同時に押すことで対応した。

○第2期：平成27年2月7日(土)～8日(日)

第1期検討会で出された意見に改良を加えた。実験自体は第1期と同様の形式で行われた。参加学生は物質化学工学科の学生で、初日は本科4年生3名、2日目は本科4年生4名である。

第1期と比べると、装置全体の小型化が図られた。また、(1)で述べたグラフ電卓のオプション機器であるLab Cradleを利用し、分光器の制御を行うArduinoからのトリガー信号を受信することでグラフ電卓のデータ収集が開始された。

○実験の概要(第1期および第2期)

① 赤外分光器の原理と構成に関する解説

近赤外と遠赤外 / 回折格子による分光の仕組み / LIA / チョッパー / モジュレーション / 反射型と透過型測定

② 光学調整とオシロスコープを利用した電子回

路の調整

0次光を用いた光源・レンズ・分光器・チョッパー・受光器の調整 / 受光器の出力電圧波形の利得・位相調整

③ 分光スペクトルの測定実験

I_0 スペクトルの測定・ I スペクトルの測定・システムの微調整の繰り返し / I_0 と I の再測定の繰り返し

④ グラフ電卓によるデータ表示と分析

サンプリング数と時間の設定(毎秒10個、45秒間収集) / データ収集 / グラフ描画(画面範囲は自動設定) / データ加工による吸光スペクトルの描画

以下に、グラフ電卓で測定した光強度スペクトルと吸収スペクトルを示す。図3の上部のグラフは試料台に何も置かないとき(I_0)、下部はポリスチレン(I)のスペクトルである。図4は、0次光の1秒後から400個のデータについて吸光度 $-\log_{10} I/I_0$ のグラフを描画したものである。グラフの横軸はデータ採取時間であり、毎秒10個で40秒間のデータが表示されている。

ポリスチレンを市販の分光器で測定すると、PbS光センサーで測定可能な範囲内に3つのピークが現れる。図4は、市販の分光器の結果をもとに横軸を波長に変換したものである。3つのピークが確認でき、0.1秒あたり約43nmの波長を掃引しているといえる。

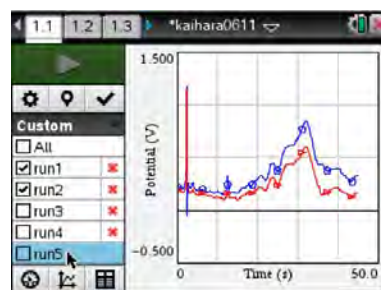


図3：スペクトル

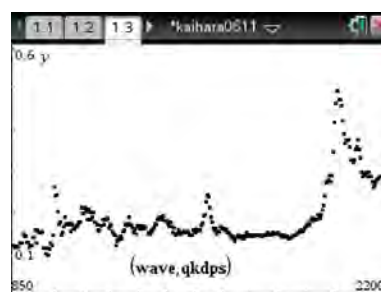


図4：吸光度

(6) 近赤外分光器の教育キット化

学生によるモニター実験は合計で4回実施し、

その都度、装置の改良点や教育キットとしての効果的な利用法等について検討を行った。その結果、本装置を教育キットとする上では、以下の事項について考慮する必要があると考える。

(6.1) 装置の構造上の改善点

- 装置の幾つかの箇所はブロック化し、実験者がそれを組み立てる形とする。具体的には、試料フォルダーと組合せレンズフォルダーはブロック化可能である。
- 本装置は透過測定モードであるが、分光器としての汎用性を考えると反射率測定もできることが望ましい。既に本キットの同型器で光ファイバーを利用した反射率測定の実験測定に成功しているため、反射率測定は可能である。
- 2チャンネルのLCD平面型オシロスコープをシャーシのフロントに取り付け、本装置だけで初期設定が可能にする。廉価なオシロスコープがあるので取付けることは容易である。

(6.2) 対象者

本システムを利用した講習を行う場合は、分光に関する知識の有無や分光器の使用頻度などにより、対象者を十分に吟味する必要がある。以下の3つのパターンが考えられる。それぞれに応じて、最初の概要説明の内容やレベル、実験の内容について適切な内容に変更する必要がある。

- ① 近赤外分光についてある程度知識がある化学系の学生や社会人
- ② 化学系以外の専門分野出身で、近赤外分光器を使う必要がある学生や社会人
- ③ 文系や高校卒、近赤外分光器を使う必要性のある学生や社会人

(6.3) マニュアルの整備

対象者のレベルに応じた解説ができるよう、実験マニュアルは詳細な内容で用意する必要がある。近赤外分光に関する概説、近赤外分光器の仕組み、そして実験手順に関する内容が含まれるべきである。グラフ電卓の操作手順は、実験手順の中に入れてよい。文系出身者や高校卒の方でも理解できるような内容にすべきである。

(7) 今後の展望

本研究では、グラフ電卓を利用した近赤外分光器の教育キット化を目指した。目標としたモノクロメーターの自作を研究期間内にできなかったが、技術的な問題があるわけではない。研究期間終了後に作成予定である。また、電源を直流電源に変更すればSN比が大きく向上すると

考えられるので、さらなる改良を図って教育キットとしての製品化を目指したい。

グラフ電卓で汎用のPbS光センサーからの信号を取得することができたことは、物理量を電圧信号に変換して出力するタイプのセンサーであれば、グラフ電卓により簡単にデータ取得と表示・分析ができることを意味している。汎用センサーの電圧変動も読み取れるので、グラフ電卓は工学教育の中で様々な形で展開することが可能と思われる。今後もグラフ電卓の工学教育での活用研究を推し進めていきたい。

5. 主な発表論文等

[発表予定] (計2件)

- ① 梅野善雄・川谷亮治・貝原巳樹雄・飯島洋祐・金野茂男・照井教文：グラフ電卓によるPbS光センサー電圧信号の取得と工学実験におけるプラットフォームとしての活用、「工学教育」に投稿予定
- ② 貝原巳樹雄・飯島洋祐・金野茂男・梅野善雄・川谷亮治・照井教文：Development of the Near-Infrared Spectrometer as an Education Kit, of which Analysis and Display Device is the Graphing Calculator, as a Handheld Technology, 「Engineering Education」に投稿予定

6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅野 善雄 (YOSHIO UMENO)
一関高専・一般教科自然科学系・特任教授
研究者番号：30042211

(2) 研究分担者

- ① 貝原 巳樹雄 (MIKIO KAIHARA)
一関高専・物質化学工学科・教授
研究者番号：20290687
- ② 川谷 亮治 (RYOJI KAWATANI)
福井大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：30169734

(3) 連携研究者

- ① 照井 教文 (NORIFUMI TERUI)
一関高専・物質化学工学科・准教授
研究者番号：20374639
- ② 飯島 洋祐 (YOUSUKE IJIMA)
小山高専・電子制御工学科・助教
研究者番号：90565441

(4) 研究協力者

金野 茂男 (SHIGEO KINNO)
小山高専・電子制御工学科・名誉教授
研究者番号：00186371