安価で簡易な LED 分光光度計の 作製とその科学教育での実践

Fabrication of a Low-price Handy LED Spectrometer and
its Practical Application to Science Education

安達 吉太郎^{※1}
Yoshitaro ADACHI

桑野 聡子^{※2}
Satoko KUWANO

淡野 照義^{※2}
Teruyoshi AWANO

星宮 務^{※2}
Tsutomu HOSHIMIYA

A low-price handy-size spectrometer was designed and fabricated. Wavelength scanning was achieved by switching LEDs with eight wavelengths. The obtained transmission spectra agreed well those obtained with a conventional spectrometer with the correlation coefficients up to 0.9985 – 0.9999. The LED spectrometer was applied to measure a time-varying chemical reaction such as neutralization titration. It was applied to a first-year natural science fundamental education. The evaluation from the students showed the usefulness of the present apparatus for the engineering basic education.

Keywords : Engineering Education, Educational Practice, Natural Science Experiment, LED Spectrometer, Real-time Measurement, Low-price

キーワード：工学教育，教育実践，自然科学実験，LED，実時間測定，簡易分光光度計

1. 序論

近年「理科離れ」の傾向が著しい日本の工学教育において、物理学・化学・生物学の実験のミニマム・エッセンシャルを一通り体験させることが極めて重要な意味を持ってきている。例えば、物理学実験における光の吸収や化学実験における滴定反応などにおいては、現象を試料の透過率、吸光度、反射率などのスペクトルの面から数量的に理解するように教育することが自然科学教育の現代化として極めて望ましいことと考えられる。学生は、分光光度計を用いた光の波長と色との関係の実験的な理解を通して、「色を判別する」と言うことが、我々の目に入ってくる光の波長を脳が分析することであることに、初めて気付かされる。このことが自然現象の背後にある物理・化学・生物的原理について興味を持ち、学習を深めていく動機に繋がるため、様々な教育場面において、色を光の波長分析的観点でとらえることによる学習効果が期待される。

このように測定結果を数値化するためには、一般に汎用の分光光度計などの高い波長分解能を有する高価な装置を購入しなければならず、大学初年度の学生実験のように人数の多い場合にはそれを一定数用意しなければならず、多数の機材を各学校に普及させるのに

は限界があった。

発光ダイオード(LED)は、個々の素子の発光波長分布が10–15nm程度と鋭く、発光領域が可視から近赤外まで種類が豊富であること、半導体素子であるため素子自体が小型で安価で入手できること、など種々の長所を有している。この点に注目すれば、高額な波長分散素子や駆動装置を用いずに、異なる発光波長のLEDの発光を電子的に切り替えることによって離散的ではあるが、波長掃引可能な分光器機能を持たせることができる^{1)–3)}。

本研究ではLEDの持つ高速波長掃引性を利用し、時間的に変化する吸収スペクトルのリアルタイム分光測定も可能な低価格で小型で自動計測可能な分光光度計の開発を目的とし、発光波長の異なる複数のLEDをマイクロコントローラ(以後マイコン)により時間的に切り替えて高速に波長掃引を行い、光センサで検出した信号を処理して試料の分光透過率をリアルタイムで表示する機能を持つ安価で簡易な分光光度計を設計・製作した。

分光測定としては、1)透過スペクトルの測定とその精度の汎用の分光光度計との比較、2)時間変化スペクトルの測定の2つを行った。さらに、本装置を大学での化学実験での教育現場で中和適定の実験に使用し、実際に使用した学生からのアンケートとともに述べて、本装置の工学基礎教育機器としての有用性について検討した結果について報告する。

2015年3月24日受付

※1 株式会社チノー

※2 東北学院大学工学部

2. 実験装置

今回作製した安価で簡易な分光光度計のブロック図を図1に示す。装置のハードウェアはマイコンで制御を行う制御部、8個の波長の異なるLEDとその光学系をまとめた光源部、光センサによる検出部の3つで構成されている。

2.1 制御部

(1) マイクロコントローラ

LED分光光度計の制御にマイコンを使うと、小型で安価で入手でき、マイクロ秒程度の時間で制御でき、またプログラミングのみで多様な制御が可能であるため、電力供給用以外のアナログ回路が不要になる等の利点がある。今回は8つのLEDを制御するための入出力ポートと透過光強度を測定するために十分な精度のあるA/D変換器を有している点から、マイコンにAtmel社のATMega168を使用した⁴⁾。

(2) ソフトウェア

多数のLEDを光源に使用する場合、発光波長選択を手動で行うと高速で切り替えることができない。このため本装置では波長選択と透過率測定をUnix OSの下でC言語により作製したソフトウェアにより自動化して行う。全体の制御はマイコンATMega168によって行っている。

(3) 信号処理法

試料を透過した光強度を時系列的に取り込んで、各波長での透過率を算出する本方式の動作原理を、赤・緑・青の3色の測定を行うモデルを用いて説明する。作製した分光測定装置を用いて、マイコン制御により赤緑青3つの波長で発光するLED光の試料を透過した強度の測定を行った。

図2は3原色をみの分光測定装置の動作のタイミングチャートを示している。上部の3つの波形は赤緑青それぞれのLEDに印加する電圧の波形を示しており、最下部の波形は試料を透過した光を受光した光センサの出力電圧波形を示している。この場合はRGB3色で説明したが、8個のLEDを用いる場合には、8個それぞれの波長に対応するLEDを時系列的に発光させる

時分割の手法によりそれぞれの波長の光学透過率の測定を行うことができる。

検出した各波長ごとの信号電圧は時系列データとしてシリアルポートからパーソナルコンピュータ(PC)に転送・表示される。装置全体はケース内に制御用マイコンATmega168, RS232変換IC(AD232), 8chのトランジスタ電流増幅回路等を基盤に組み込んで収納した。

2.2 光源部

本装置では、対象となる試料が工学基礎教育の教材であるため、可視光領域においてブロードな吸収帯を少数本もつものと考え、光源として使用するLEDには波長450nm, 470nm, 490nm, 525nm, 545nm, 590nm, 630nm, 670nmの8種類を用いた。

光源波長の掃引は、選択されたデジタル信号ポート(PORTB0-7)に出力された電圧を電流増幅して発光波長の異なる8種類のLEDを個別に駆動することによって行う。

光源に使用するLEDは同心円状に8個配置され、アルミニウムで作製した円錐状の集光支持具で支えられている。分光セルに入射して試料を透過した光は、対面に設置したフォトトランジスタTPS601で検出する。

2.3 検出部

光源部からの光は、分光セル内の試料を透過した後、光センサにより、その強度が測定される。

光センサには、近赤外域に感度ピークを持ち、ほぼ可視域をカバーする高感度なフォトトランジスタTPS601を用いた。

測定部の外部をアルミニウム製のケースで覆って迷光の除去に、また駆動電流のクロストークの除去にも配慮した。

検出されたアナログ出力をマイコンに内蔵されているA/D変換器によりデジタル化し、シリアル通信により接続したホストとなるパーソナルコンピュータ(PC)に送信して信号の処理と表示を行う。各LEDに

図1 LED分光光度計のブロック図

図2 3原色での分光測定装置の動作のタイミングチャート(上から、赤、緑、青LED、受光信号)、電圧軸は5.0 V/Div、時間軸は2.0ms/Div

対する透過光信号電圧はマイコンのA/D変換器により、時間的に区別された信号として取りこまれる。

各チャンネルのLED出力光は、光センサが飽和せず直線性が保障されるよう、駆動回路によりそれぞれの動作点の電流値を適度なレベルに調整した。

試料を透過する光強度の相対値を電圧信号として取り込み、あらかじめ測定してある蒸留水を透過した参照信号で除することにより試料の透過率を算出し、そのスペクトルの時間変化を測定する。この操作により、波長感度や光学系の補正がなされている。

図3(a)に組みあげたLED分光光度計の全体図を示す。(b)に蓋をはずした内部を示す。(b)の上半分が電子回路系で、下半分が光学系と分光セル(測定試料)となっている。分光器本体は結果的に手の平に乗るサイズ(110×80×50mm)となった。

3. 実験試料・手順

汎用の分光光度計と比較するために化学物質により着色した水溶液を試料として分光測定を行い、得られた透過スペクトルの比較を行うことにより小型で安価な代理品として使えるか確認を行った。また、分光光度計では測定が難しい、透過スペクトルが時間的に変化してしまうような試料に対して測定を行った。

3.1 着色した水溶液

参照試料として無色の蒸留水を準備し、他に緑色水溶液として塩化ニッケル($59.9 \times 10^{-3} [\text{g/mL}]$)、赤色

水溶液として塩化コバルト($37.7 \times 10^{-3} [\text{g/mL}]$)、青色水溶液として硫酸銅($115.0 \times 10^{-3} [\text{g/mL}]$)の水溶液を作製し、一般的に用いられる分光用セルに満たして試料として用いた。

3.2 中和滴定用試料

第2の実験として、2種類の試料について中和滴定の実験を行い、中和によるpHの変化を透過スペクトルの時間変化として測定した。試料(i)は無色の蒸留水を100%の基準として食酢(酸度4.2%)を120倍に希釈した水溶液に10秒ごとに1滴ずつ100倍に希釈した2N NaOHを滴下し中和滴定を行った。この際、指示薬としてプロチモールブルー溶液(以下BTB溶液)を使用した。

試料(ii)は無色の蒸留水を100%の基準として塩酸(36%)を100倍に希釈した水溶液に10秒ごとに1滴ずつ100倍に希釈した2N NaOHを滴下し中和滴定を行った。この際、指示薬としてフェノールフタレイン溶液(以下PP溶液)を使用した。

4 実験結果

4.1 実験結果

a) 着色した水溶液

汎用分光光度計UV-3100によって得られた透過率スペクトルを図4(a)に、作製した分光装置で得られた透過率スペクトルを同図(b)に示す。図4(b)においては、測定データを実線で、それに3次のスプライン補間を行った結果を破線で示した。透過率の

図3 LED分光光度計
(a) 手乗りサイズの分光器本体, (b) 蓋をはずした内部

図4 (a) 汎用分光光度計(UV3100)による透過率スペクトル, (b) LED分光光度計による透過率スペクトル。実線は8点の測定値, 破線は3次スプライン補間したデータ

一致は比較的良好で、2つの測定データ間の相関係数を求めると、赤色の試料、緑色の試料、青色の試料に対してそれぞれ0.78, 0.99, 0.88という値が得られた。一方、LED分光光度計の8波長における透過率データを400–700nmでの汎用分光光度計での測定波長441点に対応する各点に対して3次のスプラインデータ補間を行い、441個のデータを用いて相関係数を計算した。その結果、相関係数はそれぞれ、赤色試料に対しては0.78→0.9985、緑色の試料に対しては0.99→0.9999、青色試料に対しては0.88→0.9999と改善された。従って、LED分光光度計にスプライン補間機能を組み込めば、汎用分光光度計と同等の精度でスペクトルを得ることができる。

4.2 中和滴定における透過スペクトルの時間変化

試料(i)、試料(ii)に対して、それぞれ中和剤を10秒ごとに滴下を行って中和滴定の実験を行った。0.5秒おきにデータを取り込んで透過率の測定を行い、透過スペクトルの時間変化を測定した結果をそれぞれ、図5(a)、(b)に示す。

いずれの場合でも、鳥瞰図では横軸に波長を、縦軸に透過率をとり、奥行き方向に経過時間を示した(横軸は左側が長波長側、右側が短波長側になっている。)図より、食酢を滴下した試料(i)の場合では、時間経過とともに短波長側の吸収が少なくなり、逆に長波長側の吸収が増大していることが示される。

図5 (a) 試料(i)プロチモールブルー(BTB)溶液透過スペクトルの時間変化, (b) 試料(ii)フェノールフタレイン溶液(PP)溶液透過スペクトルの時間変化

一方、水酸化ナトリウムを滴下した試料(ii)の滴定の場合では、時間とともに短波長側の吸収が減少する、つまりフェノールフタレインによって赤色となっていた溶液の色が消えていく様子が明確に表示されている。

4.3 考察

作製したLED分光光度計の透過スペクトルの精度を、汎用の分光光度計UV3100(島津分光)と比較を行い、スペクトルの相関係数を求めることで評価した。赤色水溶液について、汎用分光光度計により求めた透過スペクトルと、LED分光光度計によって求められた離散的スペクトルに3次スプライン補間を用いることで得られた疑似連続スペクトルとの間の相関係数は、0.971であった。緑色水溶液に対しては0.994であった。青色水溶液に対しては0.998であった。

このように本装置は、LEDや簡単なデジタル回路のみで作成できる低価格であり、しかも10秒ごとの透過スペクトルの変化を実時間で測定できるという長所を有している。それぞれの水溶液において0.97以上の強い相関が得られているので、工学基礎教育に導入する場合には汎用の分光光度計の簡易的な代替品として十分な性能を持つものと考えられる。

5. 教育現場での実践と評価

5.1 教育実践における目的

色を判別するということは、我々の目に入ってくる光の波長を分析することである。しかしながら我々は通常、波長のことを意識すること無く、「色」として情報を認識している。例えば身近な照明器具を見ても、光は「白色」として認識しているのみである。しかしながら白熱電球と蛍光灯、LED灯はそれぞれの光の発生原理の違いにより、同じ「白色」でありながら波長が異なることが、分光器を通して確認することで初めて気付かされる。そしてこの違いに気がつくことが、その発生原理や特性について興味を持ち、学習する動機に繋がる。

このように、様々な教育場面において、波長を分析することによる学習効果が期待される。そこでここでは、メチルオレンジの中和滴定実験において色の判別に分光器を用いることによる学習効果について検証を行う。以下、メチルオレンジの中和滴定実験と教育への導入に関する概要をまとめる。化学実験においては色による物質の識別や反応の特定が必然である。しかしながら反応によっては色の判断が難しいものや、繊細な色の変化を言葉で完全に表現することが難しい場合もある。また、色覚障害の学生にとっては色による判別が非常に困難である為に、化学実験を実際に体験し、知識を身に付ける上での障害となっている。色覚障害は他の障害に比べ、外見からは分かりにくく、学校環境における色覚に関するバリアフリー対策の意識

は高いとは言えない。また特別な扱いを受けることによる差別への配慮のため、教師の指導方法により障害をカバーすることが期待されるだけで、積極的な指導を避ける傾向にある。そのため学習内容の深い理解を困難にしている場合も見られる⁵⁾。

そこでここでは色の判別が難しいメチルオレンジを用いた滴定実験において、滴定終点の判断を容易にし、実験の理解を助ける測定装置として、本研究で開発したLED分光器を用いてその教育効果を検証した。

LED分光光度計の教育実践における有用性を実証するため、東北学院大学工学部初年次学生対象の「ファンダメンタルズ実験(化学)」において授業実践を行った。この実験では食塩水の電気分解により水溶液中に発生する水酸化ナトリウムの定量の際に塩酸による滴定操作を行い、指示薬のメチルオレンジの色によって滴定終点(中和点)を定める。この滴定操作において、反応溶液の色は黄色から橙色、赤色と変化する。この色の変化は非常に微妙であり識別が困難である為、初年次の学生にとっては滴定量の正確な計測することが困難であった。本研究では、従来色視覚に依存していたメチルオレンジの中和滴定実験を、開発したLED分光測定装置により数値化し、グラフ化して中和滴定曲線を描く。そして中和点の判断を容易にすることで、この分光装置による教育効果を検証することとした。

5.2 方法

酸・塩基指示薬は、溶液の水素イオン濃度に依存して色調を変えるために、その色により酸・塩基滴定において中和点を目視するために用いる。ここで計測したメチルオレンジは弱酸性型指示薬の一つである。メチルオレンジは水素イオンの出入りにより構造が変化し、色調の変化として現れる。酸性条件では酸型構造のキノイド構造(図6(a))に、塩基性条件では塩基型構造のベンゼノイド構造(図6(b))となる。吸光分析法は、吸収スペクトルのピークシフトや吸光度の変化により溶液に含まれる溶質の性質や濃度を測定するために用いられるが、今回は指示薬の色調の読み取りに用いる。吸収スペクトルを計測する装置は本研究で開発したLED分光器を用いた。そしてここでは吸光度の

図6 メチルオレンジの分子構造
(a)キノイド構造, (b)ベンゼノイド構造

値そのものではなく、変位のみに着目することで、学生にとって終点の判断を容易にした。

5.3 学生実験・実施内容

実践実験は実験課題「電気分解で水素ガスをつくろう」において行った⁶⁾。この実験では食塩水の電気分解を行い、陰極槽に生成した水素ガス量および水酸化ナトリウムの量を定量し、実験値と理論値を比較することを目的とする。この電気分解における反応は以下の通りである。またここでは陽極には炭素、陰極にはニッケル板を用いた。

この様にして水溶液中に発生する水酸化ナトリウムの定量の際に滴定操作を行い、指示薬のメチルオレンジの色によって終点を定める。

塩酸のような強酸と、水酸化ナトリウムのような強塩基との中和滴定では、図7のように中和点の前後でpHは3から11へと急激に変化する⁷⁾。アルカリ性から酸性へとpHが変化する際に変化が分かりやすい変色域(pH 3.1~4.4)を持つメチルオレンジを実験では用いた。

生成した水酸化ナトリウムを含む陰極槽の水溶液はホールピペットを用いて25mLをコニカルビーカーに分取し、指示薬のメチルオレンジを2~3滴加えて0.1N-塩酸で滴定する。橙黄色から赤色に変わる点を終点とする。滴定は3回行い、その平均値を0.1N-塩酸の滴定量とする。

通常の実験の指導において、終点の色の判断については少しでも橙色を帯びた点がメチルオレンジの変色域に入ったpH4くらいでちょうどよく、明らかに赤色とみられるのはpHが3以下となり、滴定曲線の変化が大きくなってくるため加えすぎであると指導して

図7 0.1 mol/Lの塩酸の中和滴定曲線

図8 滴定した電気分解溶液。1は滴定前のもので、番号とともに酸性度が增加する

いる。また、終点の判定が困難な場合は、中性の純水にメチルオレンジを加えた液を標準として用意しておき、それとの色調の差が生ずる点を観察するように、と指導している。学生はその指導を元に「少しでも橙色を帯びた」と自らの判断により終点を決定する。

5.4 LED分光器実施内容・実験操作

図8に、電気分解を行った後のNaOHを含む溶液にメチルオレンジで着色し、0.1N-塩酸で滴定した時の色の変化を示す。1が滴定前で、10が塩酸を加えた量が最大のものである。実験においては4の辺りが滴定の終点であると指導している。

メチルオレンジの酸型構造の吸収スペクトルは波長505–508nmにメインピーク、その長波長側にサブシヨルダピークを持つため、透過率の変化が最大であった波長545nmでの値を用いて滴定曲線を描いた。また、ここでは吸光度の値ではなく変化のみに着目させることでメチルオレンジの濃度による影響を無視し、学生にとって中和点の判断が容易になるようにした。

実施は教養科目の位置づけである東北学院大学工学部電子工学科1年生の自然科学実験ファンダメンタルズ^{6), 8), 9)} (受講者数55名)を対象に、LED分光器の使用の有無により2グループに分けて行った。そして計測方法の違いに対する感想を比較することで、その教育効果を比較した。また学生の理解の程度を測るために、アンケートの実施と提出された実験報告書の実験誤差と実験の考察内容について確認した。アンケートの質問項目は次の通りである。

- (1) 滴定実験において終点の判断はどう行った。
- (2) 滴定実験において終点は分かりやすかったか。
- (3) 滴定実験において誤差はどのくらいだったか。

5.5 結果と考察

今回の学生による実験で得られたLED分光光度計による波長545nmに対する透過率と、市販の分光光度計(島津製作所UV-3100)により測定した透過率スペクトルの波長545nmにおける値を図9に示す。

この図からUV-3100とLED分光光度計のデータはほぼ一致することが分かる。また中和に必要な塩酸の量を、「透過率が急峻に変化する領域の中点」と定義することにより、透過率のグラフより3.60mLであると読み取ることができる。ビューレットの機械的誤差は

図9 波長545nmにおける透過率の塩酸水溶液滴下量に対する変化の比較

0.05mLであり、その他の今回得られた滴定量と理論値には大きな差は無く、中和点を知る上では問題無いと言える。

アンケートの結果、7割の学生がLED分光光度計を用いたことにより中和終点の判定が容易になったと回答した。他の学生からも否定的な回答はなく、総じてLED分光光度計により実験が容易になったと言えるであろう。具体的には以下の様な回答が目立った。

色覚により判断した場合、次の様な回答を得た。「色の変化が見難かった。」「人によって橙色の判断に差があり、中和点が実験者によって異なってしまった。」「繰り返し滴定操作を行ったが、各回における滴定量のばらつきが大きい。」

アンケートからも実験精度を出すことの難しさを述べる記述が多く見られたが、実際に提出された実験報告書の結果においても、橙色と判断した滴定量の差が最大1.5mLもあり、実験誤差としては非常に大きかった。

LED分光光度計を用いた場合は、次の様な回答を得た。

「グラフ化すると終点を判断しやすかった。」「色を数値として認識できるので分かりやすかった。」

以上の様に、色の変化の確認が容易であることがアンケートからも読み取れる。

また、色の変化の経過を数値として認識できるようになったことから、簡単な滴定曲線を書くことが可能となった。このことから、強酸と強塩基の中和反応の特徴をグラフから理解することが可能になった。

加えて、分光器を使用した結果、分かり易さ以外にも、測定として正確さが増したことによる新たな学習効果も得られた。これまでの実験では観察者である学生の感覚的な色の判断により終点を定めていたため、人為的誤差の大きい実験となり、実験報告書の考察部分が人為的誤差に偏る傾向があった。しかし分光器を

使用することにより、終点までの滴定量の誤差が1桁程度少なくなった。その結果、学習者がより科学的に意味のある論点で誤差について考察することも可能となった。

さらにアンケートの中には、LED分光光度計を通して、分光器の仕組みや光を吸収する原理などに興味が沸き、それらについて理解できるように勉強を進めたいとの意見もあった。本装置の導入により実験の理解に加え、自発的な学習への動機付けなどの教育効果があったと言える。

以上のことから、LED分光器を用いることで、色を数値で認識できるようになったことや、グラフとしてプロットが可能となったことからpHの変化を認識しやすくなったことにより、学習効果があがったと考えられる。

改善点としては、実験中に滴定曲線をPCやタブレット端末においてリアルタイムで滴定の様子を確認することができる、実験の理解度が増すと考えられ、このようなさらなる工夫を重ねることで、幅広い教育現場での活用が期待できる。また、この実験により、LED分光装置は高感度であり、通常色覚で認識困難な希薄溶液でも十分測定可能であることが分かった。今後、様々な化学反応の簡便な定量実験での使用にも十分に耐えうるものである。

6. 結論

本論文では、波長の異なるLEDを数種類準備し、マイコンによって発光を切り替える方式の簡易分光光度計を設計・試作した。8個のLEDをマイコンによって切り替えて波長掃引する方式により、汎用の分光測定装置の代用品として十分な性能の安価な（価格1万円以下）分光光度計を作製することができた。この装置の性能は、分光測定を工学基礎教育に導入できる程度の精度で測定を行う事が出来るものである事が示された。

緩やかな吸収スペクトル変化を持つ試料に対してはスプライン補間によりわずか8個のデータからも十分に吸収特性を再現する事が出来たので、本方式の分光光度計は学校での工学基礎教育には十分使用可能なものであると考えられる。

さらにこの装置では、分光スペクトルの測定のみならず、スペクトルの実時間測定を10秒ごとに自動化で測定を行える性能を有している。そのため、透過スペクトルが時間変化する中和滴定のような化学反応の実験を通して物理教育のみならず、化学を含む自然科学教育にも一定の寄与ができることが期待される。実際、

大学1年生の自然科学実験においても、7割の学生が呈色反応の中和点決定が、より容易になったと答えており、教育効果の改善に寄与したものと考えられる。

今後は、さらに多種類のLEDを切り替えられる装置にして波長分解能の改善をはかり、より効果的な装置の改善と教育への実践を行っていきたいと考えている。

付 記

LED分光光度計の製作に参考になるようハードウェアの部品図面、電子回路図、プログラム等の情報を東北学院大学工学部電子工学科のホームページに公開する予定である。

参 考 文 献

- 1) 南 信昌, 山田洋一, 鈴木 勲: 光の吸収と色: スペクトルの教材化, 宇都宮大学教育学部教育実践総合センター紀要, 28, pp.77-83, 2005
- 2) 蔦岡孝則, 他: 太陽電池を用いた光の透過率スペクトル測定, 応用物理教育, 34-1, pp.11-16, 2010
- 3) 鈴木保任, 高橋 徹, 高柳俊夫, 本水昌二, 川久保進: ものづくり教育を指向した簡易比色計及び電位差計キットの開発, 分析化学, 59-2, 125-130, 2010
- 4) 松原拓也: AVRマイコン活用ブック, 電波新聞社, 2007
- 5) 文部科学省: 色覚に関する指導の資料, 2003
- 6) 東北学院大学工学部: 自然科学実験ファンダメンタルズ, 実験書編纂の会編, 2010
- 7) 竹内敬人, 他17名: 高等学校理科用 文部科学省検定済教科書 化学, 東京書籍, 2011
- 8) 渡辺淳夫: 基礎教養化学実験(増補改訂版), 内田老鶴圃, 2000
- 9) 遠藤銀朗: 自然科学実験ファンダメンタルズ開講の背景と教育目的, 工学教育, 58-5, pp.3-6, 2010

著 者 紹 介

安達 吉太郎

東北学院大学大学院工学研究科博士課程
前記課程電子工学専攻修士(工学修士)。現
在株式会社チノ勤務