

分光測定および熱電変換を取り入れた物理学生実験の高度化

福山 隆雄, 久保田 真未

長崎大学教育学部・物理学教室

Development of physics experiment for students using spectrum analysis and thermoelectric conversion

Takao FUKUYAMA, Mami KUBOTA

要旨

教育学部・理科の3年生を対象とした物理学実験において、先端科学の教材化の観点から、スペクトロメーターを用いた分光測定、および、ペルティエ効果・ゼーベック効果を用いた熱電変換を取り入れて、物理学生実験に関する内容の高度化を試みた。

1. はじめに

学部生を対象とした物理学実験は、主に、データ処理法、測定法、力学の分野、電磁気学の分野、光・音・熱の分野、原子・分子の分野、に関する内容によって構成されている。授業科目としては、基礎的内容を扱う「物理学実験Ⅰ」、および、発展的内容を扱う「物理学実験Ⅱ」が開講されている。

両科目ともに、幅広く理系の基礎力を身につけるとともに、理科教員としての資質向上を目的として開講されているが、物理学実験Ⅰでは、中等教育の理科内容を大学教養レベルの見地から修得することを目的としている。具体的には、実験を行う意義を理解し、有効数字の意味や誤差の扱い方や各種データの取り扱いについて理解すること、基礎的な実験を通して物理学に関する原理・法則を理解すること、実験装置・器具の取り扱い方を習得すること、さらに、学校現場における理科教師として必要な実験技術や考え方について実験を通して理解すること、以上の目的をふまえて構成される。物理学実験Ⅱでは、物理学実験Ⅰで学習した内容を基礎として発展的な実験に取り組み、中等教育理科における科学的思考力と実験技術を高めることを目的としている。また、学生自ら探究課題を計画し、遂行し、発表し、レポートにまとめる、という「探究学習」を取り入れている。この探究学習は、新しくなる理科カリキュラムにおいて高等学校で取り入れられる「理数探究」と通じ、先端科学の教材化、それから、分野間の融合も視野に入れている。

物理学を専門とする福山は、これまで、学校教育の理科や技術に関わるエネルギーを中心とした分野において、学校現場における授業の指導内容に関する教材研究に、教科専門の専門性^[1-3]を活かす、という方針に基づいて、オームの法則などの電気現象^[4]や、プラズマ^[5]や、結晶構造^[6]などの、先端科学の教材化に取り組み、大学の附属校や一般公立校などの学校現場で活用してきている。

この紀要では、発展科目にあたる物理学実験Ⅱにおいて、先端科学の教材化の観点から、

スペクトロメーターを用いた分光測定を電子の比電荷測定の実験に取り入れて得られた結果、および、探究実験としてペルティエ効果・ゼーベック効果を用いた熱電変換を取り入れて得られた結果を通して、物理学生実験に関する内容の高度化について提案する。

2. 分光測定を取り入れた学生実験の高度化

2.1 分光測定理論

プラズマなどからの放射光を分光測定することによって、対象物についての様々な情報を得ることができる。まず、波長測定によってスペクトル線を同定すれば、対象物内に存在する元素の種類を知ることができる。また、スペクトル線、あるいは、連続スペクトルの強度を測ることによってプラズマの電子温度、密度を求めることができ、さらに、スペクトル線のシュタルク広がり測定することによって、プラズマ中の電子やイオンの密度、イオン温度を求めることができる。ここで、スペクトルの強度は、プラズマの電子温度の関数で表される。

プラズマが局所的な熱平衡状態にあるとき、下式を用いて、同じイオンに属する二つのスペクトル線の強度比をとることで、電子温度を求めることができる。

$$\frac{I_{nm}}{I_{kj}} = \frac{f_{nm}A_{nm}g_n}{f_{kj}A_{kj}g_k} \exp\left(-\frac{E_n - E_k}{k_B T}\right)$$

ここで、 I ：発光強度、 f ：放射振動数、 A ：遷移確率、 g ：統計学的重み、 E ：エネルギー、 k_B ：ボルツマン定数、 j, k, m, n ：エネルギー準位、 T ：絶対温度、をそれぞれ意味する。

2.2 電子の比電荷測定における分光の活用

物理学生実験の発展的テーマとして、電子の比電荷を求める実験がある。電子ビームによるプラズマ発光を伴い視覚に訴えるため、多くの高等学校物理の教科書にも写真入りで紹介されている。この実験において、分光を活用して放電球内に生成されたプラズマの温度を求めたい。

実験系は、電子ビーム発生管球と、磁場発生用の円形コイル（ヘルムホルツコイル）から構成される。管球内には低圧のヘリウム（約1.33 Pa）が封入されている。電流を用いたヒーター加熱によって金属から飛び出した熱電子が電極で加速される。その電子の一部は管内に封入されたヘリウムと衝突し、ヘリウムをプラズマ化して光を発生させるので、電子の軌道を観測することができる。

図1に、実験系の模式図を示す。本実験では、ビームの加速電圧を160 V から300 V まで変化させつつ、任意波形発生器（FG）と増幅器（AMP）を回路に組み込んで、希薄なヘリウム中に入射された電子ビームに周期的な磁場変調を加え、電子ビームを空間全体に走査することにより、放電管内に均一なプラズマが広がるように工夫した。それから、分光器（SEC2000 SPECTRA SYSTEM, BAS 製、測定可能な波長域：220～800 nm）を用いてスペクトルデータを採取した。そのデータから、スペクトルのピーク値を読みとり、電子温度についての解析を行った。図2に、分光器を用いて測定したスペクトルデータの一例を示す。

図3に、電子ビームの加速電圧と分光により求めた電子温度の関係のグラフを示す。エ

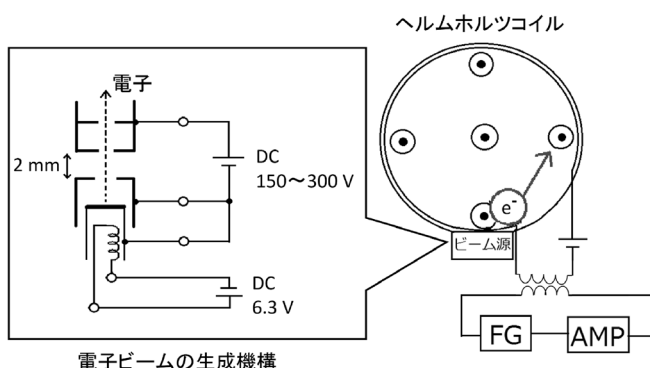


図1 実験系の模式図

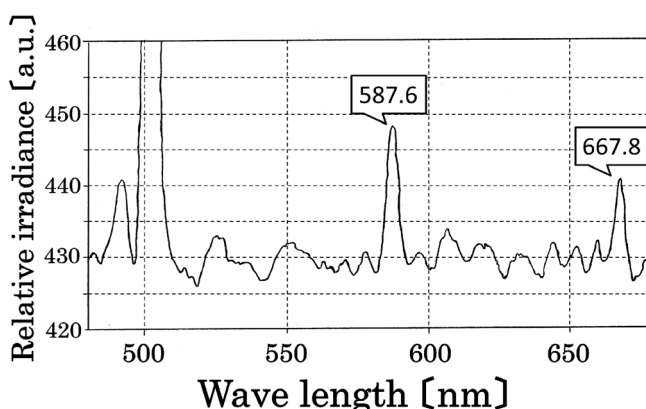


図2 分光器を用いて測定したスペクトルデータの例

ラーバーは標準偏差である。加速電圧が上がるにつれて電子温度も高くなると考えるのが自然であるが、その予想に反して、電子温度はビームの加速電圧に依存せず、おおよそ一定 (15~20 eV) であることが明らかとなった。なお、イオン温度は電子温度の10分の1程度で、プラズマの電離度は1%以下の弱电離プラズマの状態であると考えられる。本来は、この測定装置において電子の比電荷を求めることが目的であるが、実験の過程で生成されたプラズマに目を向けることで、粒子やエネルギーに関する内容について深く考えるように、実験の高度化が可能である。

図3より、電子温度はおおよそ一定 (15~20 eV) であることが明らかとなったが、絶対温度で考えると、おおよそ15~20万度であるといえる。このことは、学生が「温度」について深く考えるための題材にできる。日常生活において「10万度以上」というと、極めて高温であるかのように感じるが、本実験では、10万度以上のプラズマがガラス容器に閉じ込められている。このことは、蛍光灯などにも当てはまる。数百度の炎が手に触れると当然ながら火傷を負うが、大気圧中にグロー放電によって発生させたプラズマは電子温度が10万度以上あるにもかかわらず、火傷を負わずに手で触れることが可能である。電離度が極めて低く、かつ、中性粒子の温度は常温のためである。同じ温度 (例えば90℃) で

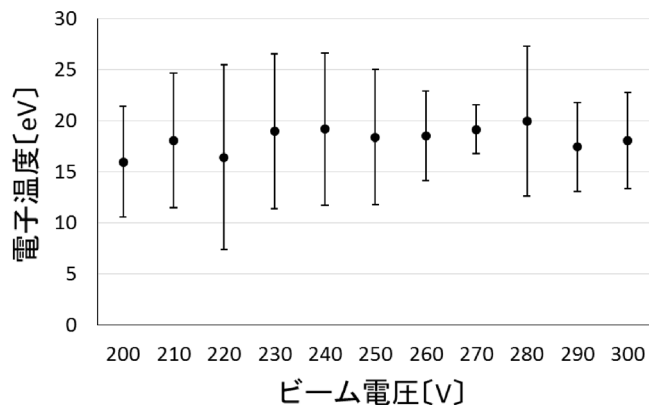


図3 電子ビームの加速電圧と分光により求めた電子温度の関係

も、熱湯とサウナでは全く異なるように、日常生活における温度の感覚では、あわせて密度を考えなければならない。このように、電子の比電荷測定における実験に分光を取り入れることで、発展的に温度とエネルギーを考えることが可能である。

3. 熱電変換を取り入れた学生実験の高度化

3.1 ペルティエ効果とゼーベック効果

種類が異なる2種類の金属接合面に電位差を加えて電流を流すと、熱が移動して温度差が生じる現象をペルティエ効果という。その逆に、種類が異なる2種類の金属接合面に温度差を加えると起電力（電圧）が生じる現象をゼーベック効果という。接合した2種類の金属を異なる温度にすることで、自由電子による熱伝導が生じる。その結果、低温側の電子密度が高温側の電子密度より大きくなり、起電力が生じる。

ペルティエ効果については、物質・物体の「静かな冷却」に利用されている。例えば、望遠鏡におけるCCDカメラ、医療用機器やコンピュータCPUなどの冷却などに利用されており、宇宙ステーションにおける冷却装置などへの利用も期待されている。ただし、欠点として電力効率が良くないということが挙げられる。ゼーベック効果については、二酸化炭素を出さないため、クリーンな発電への利用が期待されるが、現段階では発電効率が低いという問題点とともに、素材の耐久性が課題として挙げられる。

ここで、2種類の金属接合面に温度差を加えて起電力が生じるゼーベック効果を活用し、基準となる温度（通常は室温に設定）と測定対象物の温度の差と、発生する起電力の関係を調べることで、対象物の温度計測が可能である。

3.2 温度測定における熱電変換の活用

既に述べた授業科目「物理学実験Ⅱ」において、90分×2コマ×6回を用いて、学生による探究実験を実施した。探究実験は2名からなるグループにおいて実施された。探究実験のテーマは、授業者の方で10種類程度を準備して、その中から希望するテーマをグループに選ばせた。その結果、テーマ「身のまわりのものを使って、温度計をつくろう」が選ばれた。

温度計を作製するにあたって測定にどのような原理を用いるのか，学生間でいろいろな方法が検討された結果，2種類の金属接合面に温度差を加えて起電力が生じるゼーベック効果を活用することが決定された。即ちこれは熱電対の原理であるが，通常の熱電対にはクロメルやアルメルなどという，日常では手に入れるのが困難な合金が用いられているため，ホームセンターで手軽に入手できる金属線（鉄，銅，ステンレス合金）を用いることが検討された。3種類の金属について，それぞれ2種類ずつを組み合わせ，温度差を与えて生じる起電力を調べた結果，起電力が一番大きい「鉄線とステンレス合金線」が使用されることになった。

図4には実際に学生が作製した熱電対の写真，図5には図4で作製した熱電対を用いた測定中の写真を示す。測定の際には，既製品の温度計も同時に用いて，作製した熱電対の校正を行った。実験の結果，測定範囲は -9°C ～ 285°C と広く（さらに低温も測定可能と考えられる），また，反応が速く瞬時に測定が可能であることが，学生自身によって探究を通じて明らかにされた。



図4 学生が作製した熱電対の写真

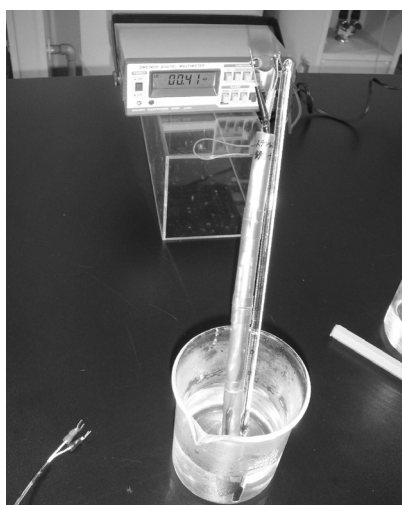


図5 作製した熱電対を用いた測定中の写真

4. まとめ

物理学生実験において、先端科学の教材化の観点から、スペクトロメーターを用いた分光測定、および、バルティエ効果・ゼーベック効果を用いた熱電変換を取り入れて、実験内容の高度化を試みた。

電子の比電荷測定の実験において分光測定理論を取り入れることで、電子ビームによって生成されたプラズマの電子温度を測定することができた。本来は電子の比電荷を求めることが目的であるが、それに加えて実験の過程で生成されたプラズマに目を向けることで、粒子やエネルギーに関する内容について深く考えるような実験の高度化が可能である。さらに発展的に、電子やイオン、中性粒子の温度を考えることが可能である。

温度測定を題材とした探究実験において、熱電変換（ゼーベック効果）を活用することで、身近な材料を用いて温度計（オリジナルの熱電対）を作製できた。熱電対はゼーベック効果を活用した「センサー」である。その大まかな概念は、中等教育の範囲でも取り扱いが可能であり、高等学校に新しく導入される「理数探究」などでの活用も期待される。

本紀要内容には、教育学部・理科専攻の宮崎啓介君および松田彩葉さんが、物理学実験Ⅱの探究実験として取り組んだ研究成果を多く含むことをここに記し、両者に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] T. Fukuyama, R. Kozakov, H. Testrich, and C. Wilke, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 024101 (2006).
- [2] T. Fukuyama and M. Okugawa, *Phys. Plasmas* **24**, 032302 (2017).
- [3] T. Fukuyama, K. Ota, and H. Sakamoto, *Phys. Plasmas* **25**, 092303 (2018).
- [4] 福山 隆雄, 九州の物理教育 **1**, 18 (2015).
- [5] 福山 隆雄, 工藤 哲洋, 長崎大学教育学部附属教育実践総合センター紀要 **15**, 403 (2016).
- [6] 白濱 弘幸, 福山 隆雄, 他, 日本産業技術教育学会誌 **58**(1), 1 (2016).