

自作の高い分解能をもつ簡易分光器による電子レンジプラズマの分光

兵庫県立姫路東高等学校 科学部（物理班）

赤瀬彩香 高瀬健斗 岩本澤治 奥見啓史 藤本大夢 安原倭 山本夏希

キーワード：電子レンジプラズマ 分光器 D線 アンテナ 第1イオン化エネルギー

① 動機・目的

2019年8月に京都大学で開催された「ひらめきときめきサイエンス」に参加し、電子レンジ内で500Wで加熱したシャープペンシルの芯が発光し、プラズマが生じる実験に参加した。このプラズマを簡易型の分光器で分光すると、ナトリウムのD線付近に強い輝線がみられ、他に目立った輝線はみられなかった¹⁾。この簡易型分光器はD線を2本に分離することができない分解能のものであった。なぜシャープペンシルの芯を入れた電子レンジ内で発生するプラズマに強いナトリウムの輝線があらわれるのか、この輝線は本当にD線なのか疑問に思った。これらの疑問を明らかにしたいと考えたが、D線を2本に

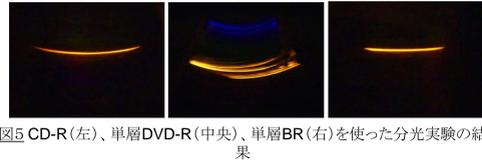
分離できるような市販の分光器は、高額なために入手できない。そこで、D1線とD2線を分離することができる高い分解能をもつ簡易分光器を工夫して自作し、これを用いて電子レンジプラズマを観察して、そのプラズマ発光の原理に迫ろうと考えた。自然界には、プラズマが普遍的にみられるが、それを電子レンジ内で再現し考察するような指向性エネルギーの研究は先行研究がほとんど見られない。このような研究は、工業的視点においても基礎研究として高い価値があるとされている。

② 高分解能を持つ分光器の作成

筆者らは、教科書をはじめとする様々な資料³⁾⁴⁾⁵⁾を参考にして、簡単に自作できる簡易分光器を作成してみたが、電子レンジ内で発生するプラズマを分光する道具として用いることはできなかった。そこで、改良型の簡易分光器を作成することにした。分光の性能を確認する方法として、低圧ナトリウムランプ光の分光を行った。

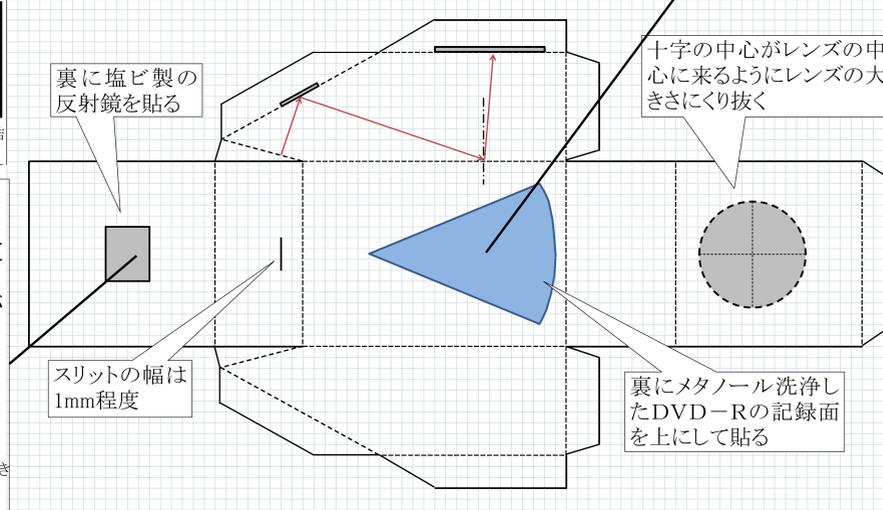
(1) 回折格子

- CD-RはD線を2本に分光することができなかった。
- BRは暗く、2本の輝線に分光できているのかどうか確認することができなかった。
- DVD-Rは、観察する角度を細かく調整すると複数の輝線に分光することができた。
- DVD-Rの盤面を用いて分光器を作成することにした。



(2) 反射鏡

- 通常のガラス製の鏡を用いてもD線を分離することはできないが、スリットからの入射光がうまくDVD-R面に反射できていない。
- ガラス製の鏡には、表面に保護膜が貼ってあることが原因だと考えた。
- 保護膜が貼られていない表面反射型の塩ビ製の鏡を用いると、観察が容易になった(図10)。



↑図3 簡易分光器の設計図(1目盛りは5mm)(破線はすべて山折り)

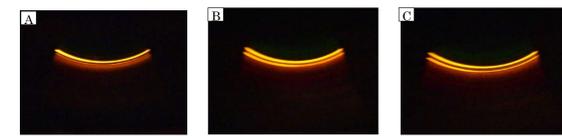
(3) デジタルカメラを用いた撮影方法

- 観察窓の高さを調節した。
- 観察窓の中心が光軸になるようにして、観察窓をデジタルカメラのレンズの先端がはまるように円形にくりぬく。
- 分光器とデジタルカメラを固定し、これを三脚でナトリウムランプの前に固定する(図11)と、安定的に輝線の画像を撮影することができる(図12)。

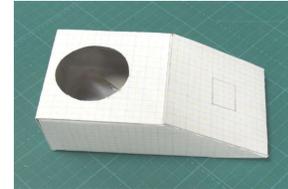


↑図11 撮影方法(周囲は白いままにしてある)

デジタルカメラの種類が異なれば、この光軸を中心とした円形の観察窓の大きさを変えればよい。



↑図12 改良型簡易分光器で分光したD線(A)観察の角度が少しでも変わると2本のD線の分離が難しくなる。(B・C)角度が固定できると、安定して2本のD線の撮影が可能になる。

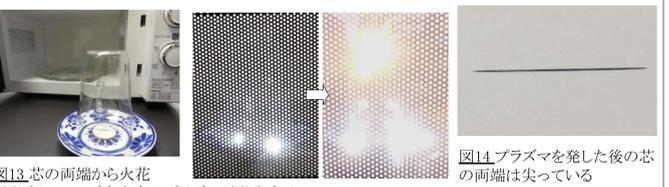


↑図2 製作した簡易分光器

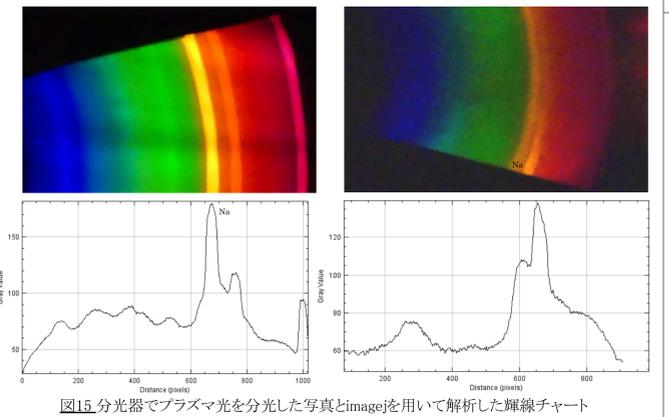
③ 電子レンジプラズマの実験と結果

(1) シャープペンシルの芯を用いた加熱実験

- 陶器の皿の上に置いた陶器の箸置きにシャープペンシルの芯(ポリマー芯)を置く。
- 耐熱ガラスのコップをかぶせて電子レンジ(100V/定格消費電力1100W/定格高周波出力700W)内に入れ、500Wで加熱を始める。
- 数秒でガラスのコップの上方にプラズマが発生する(図13)。
- 発生後の芯の両端は尖り、細く短い(図14)。
- 芯の表面は、白い粉末のようなものが付着している。



発生したプラズマを製作した分光器で分光したスペクトルを撮影し、これをimagejで分析してExcel上で補正すると、ナトリウムの強い輝線をもつことを確認することができる(図15)。



(2) プラズマが生じる芯の長さ

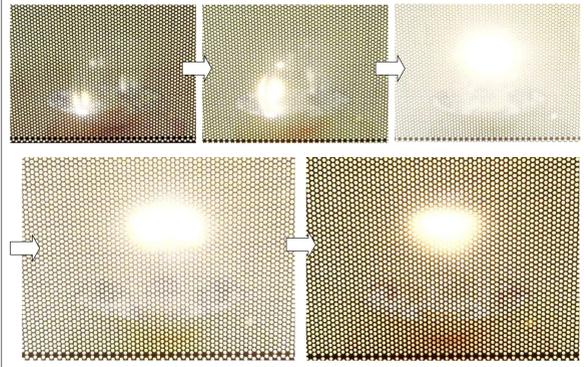
- 長さ80mmのシャープペンシルの芯を5mmずつ短くして電子レンジ内で加熱(500W/700W)し、プラズマが生じるかどうかを調べた(表1)。
- シャープペンシルの芯の太さや濃さ(硬さ)によっても、プラズマの発生が異なるのかどうかを調べた。条件を変えて実験をそれぞれ5回ずつ繰り返した。

芯の長さ (mm)	80		75		70		65		60		55	
	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3
芯の太さ	HB	2B										
出力 (W)	500	700	500	700	500	700	500	700	500	700	500	700
プラズマ発生	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×
芯の長さ (mm)	50		45		40		35		30		25	
芯の太さ (mm)	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3
芯の濃さ	HB	2B										
出力 (W)	500	700	500	700	500	700	500	700	500	700	500	700
プラズマ発生	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

表1 出力、シャープペンシルの芯の長さや太さ、濃さとプラズマの発生の有無の関係

(3) シャープペンシルの芯以外の物質を用いた実験

- シャープペンシルの芯以外にも同様のプラズマが発生するかどうかを確認するため、縫い針や銅線でも同様の実験をおこなった。
- 長さが6cmであれば、縫い針でも銅線でも、ナトリウムの輝線を持つプラズマが発生した(図16)。



↑図16 素焼きの板の上に置いた縫い針をアンテナにしたプラズマの発生

(4) アンテナを支持する台を変えてみる

- プラズマを発生させた後の箸置きを観察すると、アンテナに沿って白濁し、一部は欠けるなど破損していた(図20)。
- プラズマを発生するほどの熱を耐える儀一を支えたためと考えたが、箸置きの成分がプラズマ発生の原因になっているのではないかと考えた。
- そこで、アンテナを指示する台を素焼きの箸置きではなく、耐熱ガラスに置き換えて実験をおこなった。



↑図20 素焼きの箸置きに付着した白色物質



↑図21 耐熱ガラスにシャープペンシルの芯を置いてプラズマを発生させる実験(左)とその結果(右)

シャープペンシルの芯でも縫い針でも銅線でも、プラズマは発生しなかった(図21)。

④ 考察

- D1線の波長λは589.6nm、D2線は589.0nmであるため、分光するためには589.3nmの分解能があればよい。
- 分解能はλ/Δλ=589.3/0.6≒1000となる。回折格子の本数(線密度)が1mmあたり1000本あればよい。
- 記録用単層DVDの規格は1350本/mmとされているため、市販されている多くの分光器(600~1000本/mm)よりも、単層DVD-Rディスクが有効であると考えられる。CD-Rが分光できなかったのは、線密度が625本/mmであるからだと考えられる。
- ブルーレイディスクは、線密度がDVD-Rの約3倍で、通常のナトリウム管の明るさでは暗すぎるので、簡易分光器としては汎用性に欠ける。
- このため、簡易型分光器には単層のDVDが適している。スリット幅を1mmにし、塩ビ製の鏡で反射させた入射光を、メタノール処理して皮膜を落としたDVD-Rの記録面で回折させると、明瞭な2本のD線に分離することができる。
- デジタルカメラのレンズを簡易分光器にはめこみ、三脚で固定して撮影する。
- このように、身近にあるディスクを用いて、性能のよい分光器を自作することができた。
- 異なる濃さのシャープペンシルの芯や縫い針、銅線でも、長さが電子レンジの波長(0.122m)のほぼ半分(長さ6cm)の導体なら、それがアンテナとなってプラズマが発生する。分光によって得られた輝線は、ナトリウムのプラズマであることを示している。
- 成分が全く異なる縫い針でもプラズマが発生している。
- ナトリウムは、アンテナを置くために用いた箸置きに含まれる成分のうち、第1イオン化エネルギーが最も小さい元素であることから、アンテナの成分は関係せず、箸置きのナトリウムが励起されてプラズマとなって発光したのではないかと考えられる。

⑤ 今後の課題

- 電子レンジ内で発生したプラズマが本当にナトリウムによるものなのかどうかについて、さまざまな意見があると思うが、筆者らの観察結果に基づいて考察をおこなった。
- 電子レンジのエネルギーがどのようにして箸置きのナトリウムを励起したのかについて、今後さらに検討が必要である。

謝辞

本研究をおこなうにあたって、京都大学情報学研究所の宮崎修次先生には、電子レンジプラズマについての詳細な検討をしていただいた。LLP京都虹工房の小林仁美氏や本校科学部顧問の川勝和哉先生と藤田真央先生からは、多くの助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。なお、本研究は「ひょうごスーパーハイスクール」事業の一環としておこなったものである。

参考文献

- 1) Y.Ueno, R.Yasufuku and S.Miyazaki, Spectroscopy of plasma induced by a kitchen microwave, ELCAS Journal, 2018, 3, 102-102.
- 2) H.Khattak, P.Bianucci and A.Slepkov, Linking plasma formation in grapes to microwave resonances of aqueous dimmers, PNAS, 2019, 116, 10, p4000-4005.
- 3) 植松恒夫, 酒井啓司, 下田正編, 高等学校物理改定版, 啓林館, 2017, p210.
- 4) 若林文高, DVD分光器の回折条件, 国立科学博物館理工学研究所紀要, 2005, 28, p21-30.
- 5) 若林文高, 光を分ける一簡易分光器とそれを使った実験—スペクトルの科学的意義とDVD分光器による観察・解析法—, 化学と教育, 第65巻, 2号, 2017, 65, 2, p76-79.
- 6) <https://imagej.nih.gov/ij/>
- 7) D.F.シュライバー, P.W.アトキンス, 無機化学(上), 東京化学同人, 2001.

Appendix

1. 筆者らが製作した分光器の回折格子方程式を考える。光路差=AC-BDである。入射角をα、回折光と回折格子法線とのなす角(回折角)をβとすると、このような反射型では、sin α - sin β = Nm λとなる(N:1mmあたりの溝の本数、m:回折次数、λ:波長nm)。この分光器でNはDVDの規格1350本/mm、ナトリウムランプの波長は約589nmであるから、m=1のときsin β = sin 70° - 1350 × 589 × 10⁻⁶ = 0.1446で、β = 8° ~ 9°の回折光が得られることを示している。
2. 光の波長をλ、光の伝播速度をv、振動数をfとすると、λ = v/fで示される。光の伝播速度は、大気中でも真空中と同様に299792458m/sで近似できる。日本の電子レンジの振動数の規格は2.45GHzであるため、λ = 299792458 / (2.45 × 10⁹) ≒ 0.122mとなり、シャープペンシルの芯の長さ60mmはこれのほぼ半波長の長さになる。
3. 電子レンジ内のナトリウムの輝線については、LLP京都虹工房の小林仁美氏の協力を得て、恒星の光を分光することができるような高性能の分光器を用いて分光したところ、ナトリウムの波長の強い輝線であることが示された。

