



サロン

たかがロウソク，されどロウソク

—理科教育にも使える身近なプラズマ—

藤田 順治

(原稿受付：2012年5月8日)

1. はじめに

ロウソクは古より光源として広く用いられ、宗教儀式にとってもなくてはならない存在であった。そして鎮魂のともしびとして心に訴えるものを持っている。このロウソクを科学の目でとらえた Faraday の名著「ロウソクの科学」は古今の名著として広く読まれている。

ロウソクの炎に強い電場をかけると、明るく輝いている炎の先端部がマイナス極の方へたなびくことはよく知られており、A. von Engel の著名な教科書[1]でも図入りで紹介されている。この部分が熱電離によりプラスに帯電した粒子であるとすれば、熱電離で生じた電子はどのような振る舞いをしているのであろうか。このことがずっと気にかかっていた。

筆者らは数年来、若者の理科離れを何とか食い止めたいと願い、名古屋市科学館で「先進科学塾」と題したボランティア活動を続けている。これは科学を思いっきり楽しみながら科学に対する興味と関心を深めてもらおうというものである。ここでの経験と蓄積を活かし、2011年度は高校の Super Science High School (SSH) 活動とも連携して理科教育のお手伝いをしている。

核融合炉の実現という長い道のりを考えると、若い人たちにもっと興味と関心を持ってもらわねばならない。しかし、プラズマをテーマとして取り上げ、プラズマの性質を理解するための演示実験を行おうとすると、どうしても大掛かりな実験装置が必要となる。

2011年末の SSH 活動においてロウソクの炎の実験を取り上げ、炎の様子が四方八方から観測できるように電極板を金網にして電場をかける実験を行った。金網電極とした余得は思わぬところにあり、ある高校教師の提案で電極外部の大気の流れを観測してみようということになった。その結果、炎がたなびくマイナス極の外部では、予想される通り外向きの大きな大気の流れが見られたが、プラス極の外部でも、非常に局部的ではあるが外向きのかなり強い大気の流れが観測された。この電極を通過した粒子の電荷を極性判別機能付き箔検電器[2]を用いて調べたところ、マイナスであることが確かめられた。

炎の中で熱電離が起こっていれば、電離度はきわめて低いであろうがプラズマとしての性質も持っているものと考え、プローブ挿入による擾乱や、放電プラズマとは訳が違

うことなどの問題点は承知の上で、手軽で有用なラングミュア・プローブ測定を試みた。その結果、電子温度は約 0.2 から 0.3 eV、電子密度は約 10^{13} m^{-3} のオーダーという値が得られた。

これらの実験によって、俄然、ロウソクも捨てたものではないな！との思いに至った。複雑で高価な装置を用いなくても、電離現象や基礎過程、生成されたプラズマの性質を知ることができ、中で起こっているプロセスについて、いろいろと思考を巡らす絶好の教材となる。一般市民や若い人々に対するプラズマに関する楽しい演示実験の一つとして役立つだけでなく、炎の燃焼機構解明にもつながる意味ある実験になるものと思われる。

2. ロウソクの炎に電場をかける

図1の装置概念図に示すように、シースルーの実験装置を製作した。4 cm の間隔で立てられた金網電極間に約 4 kV の電圧をかけた。大気の流れは線香の煙や別のロウソクの炎のたなびき方によって観測した。明るく輝く炎の先端部はマイナス極の方にたなびく。そのとき、マイナス極外部では、外向きの大きな大気の流れが観測された。これは、熱電離で生じた炭素イオンやプラスに帯電した炭素の微粒子がマイナス極に向かって加速され、電極表面で電荷が中和された後も、あるいは中和しきれなかったものも、外向きに運動を続けていると考えられる。また、大気を構成する分子のうち、これらのイオンと衝突して外向きの運動量を得たものも加わっているであろう。

一方、熱電離で生成された電子は、電場で加速されて大気分子と衝突を繰り返しながらプラス極へとドリフトして行く。平均衝突距離は $1 \mu\text{m}$ 程度と短いため電場から得るエネルギーは小さく、放電に進展するほどの電離衝突を起こすまでには至らない。しかし、電子と酸素分子との電子付着衝突の断面積は大きく、負イオンが生成されているものと考えられる。こうして作られた負イオンはプラス極の方へとドリフトしていくが、電極表面で電荷は失っても、さらに外向きの運動を続けるものもあれば、金網を通り抜けて進むものもある。また、衝突によって運動量を貰った大気分子も外向きに流れて行くと考えられる。このことは、プラス極の外側においても外向きの大気の流れが観測

されたことから実証される。ここで改めて炎の形状を注意深く観察すると、炎の下部がわずかではあるがプラス極の方へ膨らんでいることが分かる。外向きの大気の流れがまさにその延長線上の狭い範囲に限られていることから、上述の僅かながらの電離衝突も手伝ってチャンネルのようなものが形成され、大半の電子と負イオンはそれに沿って流れているものと思われる。

図2 (a), (b), (c)は、それぞれ、右側電極をアース電位とし、左電極をプラス、共にアース電位、左電極をマイナス電位としたときの、炎のたなびきと、電極外部の大気の流れを線香の煙の挙動で示した写真である。

次に、線香に替えて極性判別機能付きアルミ箔検電器[2]を用い、電極を通過した粒子の電荷を調べた。この検電器は、アルミ箔に対して直角方向、つまり箔の開く方向に電場をかけ、どちら向きの箔が開くかによって誘起された電荷の極性を知ろうとするものである。この検電器と炎に対する電場印加のためには、ブロッキング発振とコッククロフト・ウォルトン回路をベースとした自作の高電圧電源を用いた[2]。その結果、箔にマイナスの電荷が誘起されることが確認された。金網電極で電荷を失いきれなかった負イオンが電荷捕集電極まで達したのものと思われる。電極

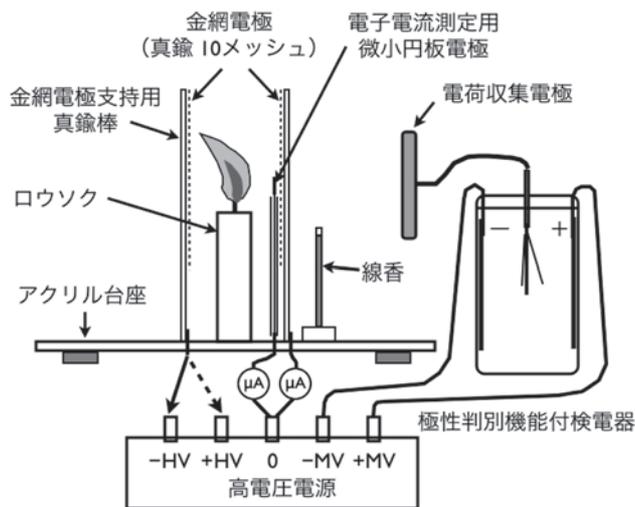


図1 ロウソクの炎への電場印加実験装置概念図。アース電位の右側電極外部の大気の流れを線香の煙で、流れてきた粒子の電荷を極性判別機能付き検電器で検出。

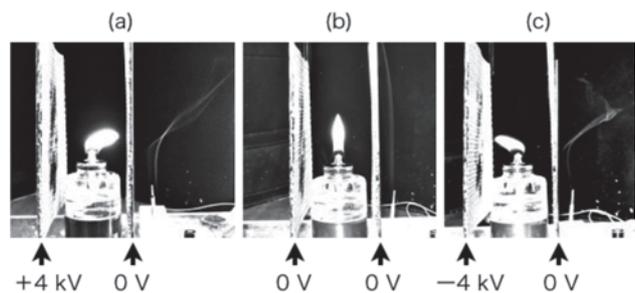


図2 炎のたなびきと電極外部の大気の流れを示す写真。すべて右側電極をアース電位に保ち、左電極をプラス(a)、アース(b)、マイナス電位(c)とした。再現性の観点からオイルランプを用いた。(c)では、炎は左に、線香の煙は右へたなびいている。

に加える電圧の極性を逆転させて、炎の先がたなびく側の電極外部で粒子の電荷を調べたところ、これは予想どおり、プラスの電荷が誘起された。

プラス極へとドリフトする電子流を調べようと、電極直前に表面積3 mm²程度の小電極をおき、位置を変えて流入する電流を測定したところ、これも強い大気の流れが観測された数mmの範囲で、最大約2 μAの電流が観測された。電極全体での電流が約3 μAであることを考えると、電子電流の大半はこの領域に集中していることになる。

ここでクイズを一つ。電極前面をガラスのような絶縁物で覆ったら、たなびいていた炎はどうなるであろうか？誘電体を間に入れても電場はシールドされないから、変化なくたなびくか、回路として電流は流れなくなるので炎はたなびかないか。答えは後者である。なぜ電場がかからなくなるのか、読者の皆さんの頭の体操に残しておく。

3. 炎プラズマのプローブ測定

電位の基準となる電極を持たないプラズマに対してはダブルプローブを用いるのが常識であろうが、より多くの情報が得られ、プラズマの性質を知るために有用であるシングルプローブ法を適用することにした。しかし、プラズマの電位の基準が必要である。そこで、φ0.3のステンレス線をロウソクの炎を取り囲むようにコイル状に巻き、電位の基準を定める電極とした。炎の燃焼流は上向きなので、擾乱を少なくするため、下流つまり炎の上寄りに設置した。

プラズマ中に小電極を挿入すると、電子と正イオンとが同じ温度であっても、流入する粒子束は質量の違いにより電子の方が圧倒的に大きい。したがって、小電極の電位は自動的にプラズマの電位よりもマイナスとなって、電子電流とイオン電流が釣り合って正味電流がゼロとなる浮遊電位 (floating potential) に落ち着く。しかし、この小電極が赤熱されて熱電子を放出し得る場合には、その電位がプラズマ電位よりも低い限り熱電子が放出され、正味電流がゼロとなるように自動的にプラズマ電位に落ち着く。エミッシブ・プローブ (emissive probe) の原理である。それ故この赤熱される電位基準電極はシングルプローブ測定の基準電位としてお誂え向きである。プローブはφ0.8のMo線を断面だけプラズマに面するようにセラミックスの碍管で覆い、経方向に挿入した。

ロウソクの炎は安定しているとは限らないので、その時間変化に較べて充分短い時間内にプローブ特性を取らなくてはならない。そこで、プローブ電圧を数ボルト程度時間的に変化させ、電流は直列に挿入した抵抗の両端に現れる電圧としてオシロスコープで観測する。手軽に実験するには交流トランスを用いて3 Vもかければ充分である。しかし、プローブの周りにできるシースの応答時間を考えると、あまり高速でプローブ電圧を掃引することはできない。ここでは繰り返し20 Hzの三角波を加えた。また、印加電圧を高くし過ぎると、プローブ電流を取り込むことによる炎プラズマへの擾乱が激しくなるので、プローブ特性が取れる範囲でなるべく低くした方がよい。

図3にプローブ測定回路の概念図を示す。Ch.1の電圧と

Ch. 2の電流を X-Y 表示すればプローブ特性を直視することもできる。プローブ電流は 10 nA オーダーと微小な値なので、ノイズの除去が必須である。デジタルオシロスコプの平均操作機能を用いてノイズを除去し、Excelに取り込んで散布図を描かせるのが実際のであろう。プローブ測定の原理については、文献[3,4]を参照されたい。

炎の上流つまり下部で取ったプローブ特性の一例を図4に示す。プローブ電流の立ち上がり部分は指数関数的に上昇している。この領域ではイオン電流はほぼ一定なので、正味の電子電流が電圧とともに指数関数的に上昇しており、電子のエネルギー分布関数がマックスウエル・ボルツマン分布に従っていることを示唆している。指数関数へのフィッティングから指数を求め、その逆数から電子温度を算出すると、約 0.26 eV という値が得られた。この電子電流に負イオン電流が含まれているか否かは定かではないが、炎の中では負イオンはあまり存在しないのではないかと考えられる。

数種の正イオンが存在しているときには、それぞれの密度比が分かっているか否かは飽和電流値からイオン密度を求めることはできない。飽和イオン電流値を読み取り、上記の電子温度を式に代入してイオン密度を求めてみると、すべてのイオンが H^+ と仮定すると約 $2 \times 10^{13} m^{-3}$ 、すべて C^+ と仮定すると約 $7 \times 10^{13} m^{-3}$ という値が得られ、電離度は約 10^{-12} と見積もられる。炎の上部では電子温度が約 0.35 eV とやや高めであったが、イオン密度は逆にやや低めで、 H^+ とすれば $1.2 \times 10^{13} m^{-3}$ 、 C^+ であれば $4.2 \times 10^{13} m^{-3}$ であった。燃焼流が上向きであることを考慮すれば、下流

ほど流速は大きく、したがって密度は低くなっていることも予想されるし、イオン種 H^+ と C^+ との成分比が炎の位置によって異なることも考えられる。プローブ特性から推定されるプラズマ電位は、上流部ではほぼ 0 V であるが、下流部では、+0.3 から +0.6 V と、やや高くなっている。プラズマ電位も空間的な構造を持っているようである。

プローブ位置を精密に制御できる治具を用意して、上記のイオン密度と成分比を含めて、プラズマ諸量の空間分布を詳細に測定すれば、ロウソクの炎の燃焼過程を知る上で有用なデータが得られるものと思われる。

4. おわりに

ロウソクの炎全体がプラズマであるか否かについては議論の余地が残る。最も密度の高い部分では、デバイの長さを計算すると約 0.3 mm となり、炎のサイズより小さい。しかし炎の先端部のように密度が低い領域では既に炎のサイズを上回ってプラズマの定義を満たさなくなるであろう。したがって、炎に電場をかけたとき、中心部ではプラズマとしての性質から電場はしみ込まず、炎はあまり動かないが、先端部ではその性質を失って電場がしみ込み、正に帯電したカーボン微粒子が電場から力を受けてたなびいたものと解釈できる。また、プローブ測定で、電子電流がプローブ電圧とともに指数関数的に立ち上がっていて、いわゆるプローブ特性が得られていることも、プローブの周りにシースが形成されるという、プラズマ固有の性質の一端を見せているものと思われる。

炎の中では、常にプラズマの生成と消滅が起こっており、決して平衡状態にはない。これらの実験で、生起しているいろいろなプロセスについて考えるきっかけを作ってくれるという意味でも興味深いテーマではある。

ローテク駆使の文字通り我が家での Kitchen Physics には自ずと限界がある。より設備の整った環境でハイテクを駆使し、さらに、再現性の観点からアルコールランプやベンゼンバーナーなどを用いて、より精度の高い実験を進めることができれば、炎のプラズマそのものの性質や生成過程を知ることでもできるし、それをベースとしてプラズマに関心を持つ人々への絶好の入門実験のシナリオを作ることでもできるであろう。

どなたか、この仕事を一緒に続けてくださる方、いろいろとご教示いただける方、独自に進めてくださる方がいらっしやれば、これに過ぎたる喜びはない。

この実験に協力して下さった林照崇氏に感謝の意を表したい。

参考文献

- [1] A. von Engel, *Ionized Gases* (Oxford Press, 1955).
- [2] 藤田順治, 林 照崇: 応用物理教育 35, 1 (2011).
- [3] プラズマ・核融合学会編: プラズマの生成と診断 (コロナ社, 2004).
- [4] プラズマ・核融合学会編: プラズマ診断の基礎と応用 (コロナ社, 2006).

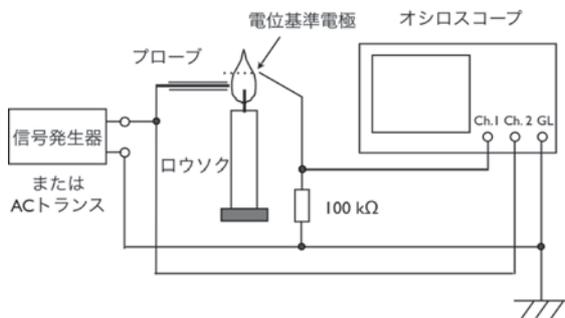


図3 ロウソクの炎のプローブ測定回路概念図。

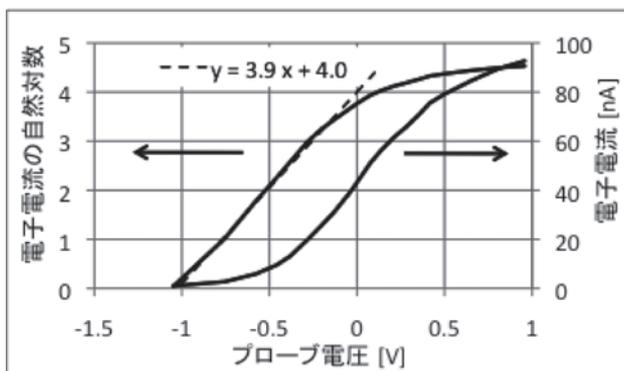


図4 プローブ特性の一例。プローブ電圧が-1 から 0 V の間で、電子電流は指数関数的に増大している。この指数から電子温度を求めると 0.26 eV となる。