

酸素と共存する気体が線香の燃焼に必要な 最低酸素濃度に及ぼす影響

和泉研二・野澤聖也*

Effects of Inert Gas on the Minimum Oxygen Concentration for Continuous
Burning of an Incense Stick in Oxygen/Inert Gas Mixtures

WAIZUMI Kenji, NOZAWA Seiya

(Received September 25, 2015)

1. はじめに

燃焼現象は多くの化学的要素を含む興味深い研究対象であると同時に、ロウソクやガスの燃焼など、私たちの生活に身近な化学現象の一つである。燃焼現象に対する正しい理解や知識は、火災防止や適切な消火活動を行う指針や内燃機関の効率性の向上など、一般生活にとっても重要である。日本の学校教育では、ものが燃えると酸素が消費されて二酸化炭素ができることなどを、小学校6年生における学習で学んでいる。

燃焼現象に関する理解度は、国際教育到達度評価学会 (International Association for the Evaluation of Educational Achievement; IEA) が進める国際数学・理科教育動向調査 (Trends in International Mathematics and Science Study; TIMSS) や、経済協力開発機構 (Organization for Economic Co-operation and Development; OECD) が行っているPISA (Programme for International Student Assessment) などに幾度か出題され、これまでも幾度か調査・分析が行われてきた。その中でも、「二酸化炭素は、ある種の消火器に使用される物質です。二酸化炭素はどのようにして火を消すのか、説明しなさい。」という、TIMSS1995の「二酸化炭素と消火器」に関する課題は、日本の中学生1、2年生の正答率 (36%及び45%) が国際平均 (42%及び51%) に比べて有意に低く¹⁾、注目された課題であった。

この課題の正答例は、「酸素または空気をおしのける」とされているが、正答率が国際平均よりも低い原因として、松原(1999)²⁾は、日本では根拠を説明することが重要視されないため、「二酸化炭素は火を消す働きがあるから火が消えるのは当然である」と考えたためと推測した。また、中山ら (2004)³⁾ は、実際に生徒の回答に用いられた用語を分析した結果、「日本の中学生には、燃焼が起こるか起こらないかを「酸素」や「二酸化炭素」の「ある」と「ない」で説明する傾向が認められる。(中略) 本質的な部分に注目して理論的な説明を行うよりも、「二酸化炭素があったから消えた」といった現象的な説明に向かう傾向にある。すなわち、理論よりも現象に注目する傾向が、酸化や燃焼に関する論述式課題に対する低い正答率の背後にある可能性がある。」と述べている。中山ら (2004)³⁾ の分析では、酸素や空気をおしのけるという内容の回答を正答とし、「二酸化炭素が火を冷やす」など、二酸化炭素についての説明して

* 山口大学教育学部卒業生

いる回答は、誤答としている。また、齊藤ら(2006)⁴⁾は、日本の大半の中学生は、火のついたろうソクを集気びんの中に入れて蓋をすると火が消えるのを、「酸素が減って、二酸化炭素が増えたから」と、二酸化炭素にも消化作用があると考えていると報告した。

一方、寺田ら(2014)⁵⁾は、このような概念を中学生が保持している原因として、「燃焼を学習している小学校6年生の実験の指導方法の展開として、消火が酸素であるのか二酸化炭素であるのかを明確に定量的に示すことができない展開になっている」ことを指摘し、教材の開発を試みた。彼らは、酸素に窒素や二酸化炭素を一定の割合で混合した気体中に炎のついたろうソクを入れ、炎が瞬時に消えるかどうかで、それらの混合気体中で燃焼に必要な最低酸素濃度を見積もった。その結果、二酸化炭素は窒素より消火に与える影響が大きく、高濃度の二酸化炭素は消火を早めることを示した。彼らはこの原因として、消防庁の通知(1996)⁶⁾を引用し、窒素よりも二酸化炭素の熱容量が大きいいため、炎から熱を奪い、炎の温度を低下させる作用をあげている。そして彼らは、「酸素の濃度だけが燃焼を決めているのではなく、小学生、中学生、一般社会人だけでなく、理科を専門とする教師も「二酸化炭素には消化作用がまったくない」という間違っただけの素朴概念をもっていることが明らかになった。」と指摘した。また、筆者らは、大学生に対して燃焼現象に関する簡単なアンケートを行ったが、そこでも、同様の間違っただけの概念をもった学生が多かった(投稿準備中)。

これらの経緯から、筆者らは、燃焼と消火に関する誤概念を払拭するためには、だれにでもすぐに納得できるような実験が必要ではないかと考えた。そこで今回、酸素以外の気体が燃焼にどのように影響するかを定量的に理解することができ、学校現場でも簡便に測定可能な教材開発をコンセプトとして教材開発を行った。

その結果、今回開発した教具を用いることによって、酸素と燃焼に不活性な気体(ヘリウム、窒素、アルゴンまたは二酸化炭素)の二成分混合気体中において、線香の燃焼に必要な最低酸素濃度*を決定することが可能となった。また、得られた結果から、不活性ガスの違いによる最低酸素濃度は、アルゴン<窒素<二酸化炭素<ヘリウムの順に大きくなり、その順に火が早く消える(消火作用が大きい)こと、その違いは不活性ガスの熱伝導から解釈できること明らかにした。

2. 教材開発 ～開発した装置の概要と実験の手順～

酸素と酸素以外の燃焼に不活性な気体の混合気体中において、可燃物の燃焼に必要な最低酸素濃度を得るための教材を開発するにあたっては、いくつかの課題を解決する必要がある。最も大きな課題は、火のついた可燃物を混合気体に挿入する際、中の気体が外に漏れないようにしながら、如何に速やかに火のついた可燃物を挿入できるかであり、また挿入後、外気の入流や混合気体の流出を避けるため、如何に速やかに外気と遮断することができるかである。今回作成した装置では、その課題を解決した。装置の概略を図1に示す。

学校現場でも簡便に測定可能な教材開発をコンセプトとしているため、混合気体封入し、その中で可燃物を燃やす燃焼観察容器は、500mlの半分に切ったペットボトル容器に両面テープでポリエチレン袋を組み合わせることによって作成した。ペットボトルの側面に穴を開け、気

* 材料が燃焼を続けるために必要な最低酸素濃度(Minimum Oxygen Concentration)は、限界酸素濃度(Limiting Oxygen Concentration)とも呼ばれ、限界酸素指数(Limited Oxygen Index)としても知られている⁷⁾。材料による火災の危険性を評価する重要な指標の一つとなっており、その濃度は、可燃物の種類、温度や圧力などによっても異なる。

体の挿入・排出用コックを取り付けた。また、ペットボトルの飲み口側には薄いビニールシートを被せ、輪ゴムで縛ることによって、密封状態が保持できるようにした。

本装置では、ポリエチレン袋をペットボトルの内側に貼付くように手で押さえつけられる構造となっている。さらに真空ポンプで隙間に残った空気を抜くことによって、容器は容量がほぼゼロで、空気のない状態にすることができる。その後、混合気体を注入することでポリエチレン袋を膨らませるため、所定の組成を損なうことなく容器を混合気体で満たすことが可能である。

可燃物としては、線香（日本香堂、山水香）を用いた。線香はあらかじめ火を付けた状態で、板においた粘土で固定しておく。実験では、所定の混合気体を入れた燃焼観察容器を、ペットボトルの口の方を下にして、線香の真上から垂直に降ろす。振り下ろす過程で、飲み口に被せたビニールシートが線香の熱で溶けて、その部分だけ穴が空き、線香は容器の中に入って行く。さらに飲み口が下の粘土に到達すると、粘土が飲み口を塞ぐため、すぐに容器は密封され、気密性が保持されるようになっている。以上の装置と操作によって、当初の課題を解決することができた。

混合気体は、テドラーバックに入れた気体を、所定の量だけシリンジで計りとり、それらを混合することによって作成した。各実験とも混合気体500mlを燃焼観察容器に注入した。

今回の実験では線香を用いたが、細いロウソクでも実験は可能である。ただし、熱によるポリエチレン袋の変異や延焼に対する注意が必要であり、学校での使用には難燃性の素材に変更することも必要である。

3. 実験及び結果

酸素と混合する気体は、窒素、二酸化炭素、アルゴン、ヘリウムを用いた。線香の消火の確認方法は目視により行い、各濃度3回ずつ測定した。

酸素と混合した気体の濃度による燃焼時間の変化を図2に示す。縦軸は、線香挿入後からの燃焼持続時間で、横軸は混合気体中の酸素濃度である。同一の組成の混合気体での実験は3回繰り返し、平均時間をプロットした。比較のため、空気も同様の実験を3回行い、図2中に示した。空気の組成は、窒素約79%、酸素約21%であり、妥当な位置にプロットされていることがわかる。

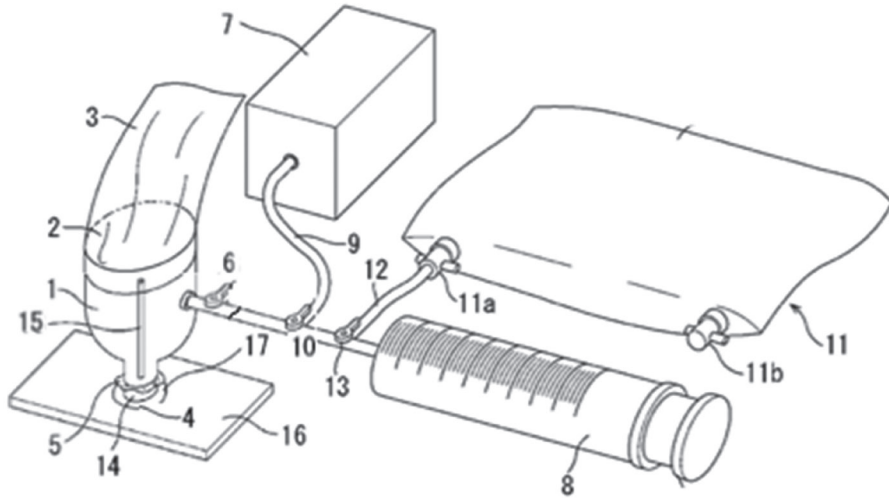


図1 燃焼観察実験装置*の概要

1. 容器（今回はペットボトル）、2. 開口部、3. 袋状部材（今回は厚手ポリエチレン袋を両面テープでペットボトルに貼付けた）、4. 第1孔部（ペットボトルの飲み口）、5. ポリエチレンフィルム（ペットボトルの口に被せ、輪ゴムで固定）、6. ペットボトル側面装着コック、7. 排気用ポンプ、8. 実験ガス導入用シリンジ、9. 排気用ホース、10. 排気用コック、11. 実験ガス貯留容器（テドラーバック）、11a, b. 通気口（コック）、12. 混合気体吸入用ホース、13. 同コック、14. 蓋（薄いビニールシート）、15. 線香（挿入後）、16. プレート（木板）、17. 粘土。線香挿入前には、6のコックを閉じてから燃焼観察用容器からホースを抜くことで、シリンジ側を観察容器から切り離して使用する。

* 現在、特許出願中：和泉研二、野澤聖也、「燃焼観察実験装置」、特願2015-143322、平成27年7月17日。

図2から、いずれの混合気体でも、酸素濃度が少なくなるに連れて燃焼時間が短くなるが、同じ酸素量でも混合する気体によって線香の燃焼時間に大きな差があることは明瞭である。例えば、アルゴンでは、15%程度の酸素量でも燃えるが、ヘリウムでは、25%程度の酸素量がなければ、燃え続けることができないことや、二酸化炭素が80%あっても燃焼できることなどが容易に分かる。

図2の酸素濃度を対数にして表したグラフを、図3に示す。直線は、最小自乗法によって得た近似直線であり、その切片から燃焼が持続するために必要な酸素濃度を求めた。その結果、必要な酸素量とその順番は、アルゴン (12.0%) < 窒素 (14.9%) < 二酸化炭素 (16.4%) < ヘリウム (23.2%) となった。

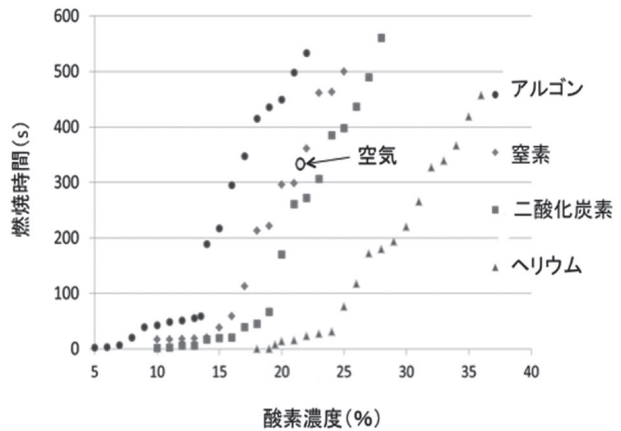


図2 酸素／不活性ガス 二成分混合気体中における線香の燃焼時間

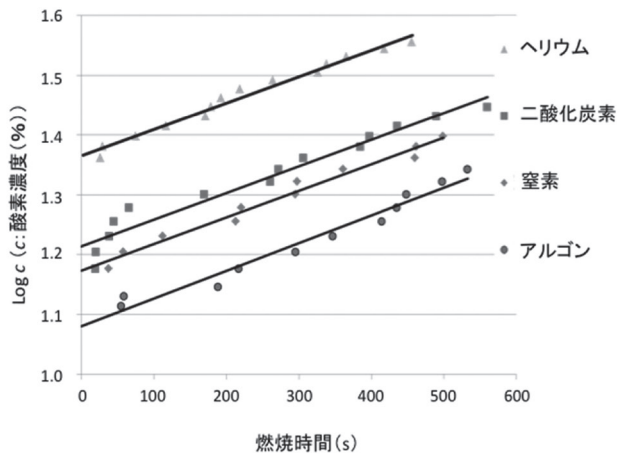


図3 酸素／不活性ガス 二成分混合気体中における燃焼時間 (酸素濃度対数表示)。

4. 考察

これらの結果から、消火は酸素濃度の低下によって引き起こされるものの、燃焼に必要な最低酸素量は、酸素以外の気体の影響を強く受けることが確認された。空気中や窒素中に比べると、ヘリウム中や二酸化炭素中の方が早く消える。すなわちこれらの気体には消火を促進する効果がある。逆にアルゴン中では遅く消え、消火を送らせる働きがあることが定量的に明確になった。

先の消防庁通知⁶⁾でも、アルゴン、窒素、二酸化炭素において最低必要酸素濃度を報告しており、それらの値は今回得られた値と類似したものとなっている。その中で、二酸化炭素消火器が火を早く消すことができるのは、二酸化炭素は窒素に比べて比熱 (熱容量) が大きく、熱を奪う効果が大きいためであり、「比熱の大きい不活性気体ほど熱容量が大きくなるので、消火に必要な量は少なくて済む。(中略) 各不活性気体の消炎濃度と定圧比熱の関係は、このことを証明している」と述べている。

各気体の定圧モル比熱 (定圧モル熱容量) を表1に示す。線香の火の温度が700~800°Cと

されているため⁸⁾、1000Kでの値も示した。

表1から、確かに、アルゴンと窒素と二酸化炭素の熱容量のみに着目すると、消防庁の説明⁶⁾は正しいように思われる。その解釈が正しく、熱容量の大きな気体の方が消火を促進するとすれば、ヘリウムはアルゴンと同様の結果になり、その順序は、ヘリウム \approx アルゴン $<$ 窒素 $<$ 二酸化炭素になるはずである。しかし、今回の実験では、この中で最も比熱が小さく、最も消火が遅くなるはずのヘリウムで最も早く消火した（最低必要酸素濃度が最も高い）。つまり、消火への寄与は、比熱だけでは説明できず、従来の解釈は不十分である。

表1には、各気体の熱伝導率も示した。熱伝導は、単位時間・単位面積当たりの熱量の流れで表わされる量であり、温度勾配に比例する。熱伝導率は、その比例係数である。詳細は、気体の分子運動論に委ねるが、概ね、分子の平均自由行程 λ 、平均速度 v 、比熱 C によって、 $\lambda v C$ として評価できる量である。

表1 気体の定圧熱容量⁹⁾と熱伝導率^{10),*}

気体	定圧モル熱容量 (比熱) (J/mol・K)		熱伝導率 (10^{-4} W/m・K)	
	300K	1000K	300K	1000K
He	20.79 ¹¹⁾	20.79 ¹¹⁾	1510	3600
N ₂	29.17	32.70	259	647
O ₂	29.44	34.88	267.4	717
Ar	20.83	20.79	178.7	435.9
CO ₂	37.52	54.32	166.2	680

* 共に1気圧における値。

これらの気体の中では、ヘリウムの熱伝導率は他の気体より一桁大きく、特に熱を奪いやすい気体である。酸素/ヘリウム混合気体中で消火が促進されたのは、熱伝導率の大きなヘリウムが熱を素早く奪い、火の温度を下げる効果が大きいためと考えられる。一方、アルゴンの熱伝導率は最も小さく熱を奪い難い気体である。酸素/アルゴン混合気体中での消火が最も遅かった（最低必要酸素濃度が最も低い）のは、熱容量的に小さいことも影響するであろうが、熱伝導率の方が主要な原因ではないかと推察する。

窒素と二酸化炭素の熱伝導率を比較すると、300Kで比較すると窒素の方が二酸化炭素よりも大きい。すると、熱伝導率からは、二酸化炭素の方が窒素よりも消火の効果大きいという実験結果を説明できないようにも思われる。しかし、二酸化炭素と窒素の熱伝導率は790Kくらいから逆転し、それ以上の温度では二酸化炭素の方が窒素よりも大きくなる¹⁰⁾。従って、燃焼する線香から熱を奪う熱伝導率による効果は、二酸化炭素の方が大きいと言え、実験結果と矛盾しない。つまり、燃焼に必要な最低酸素量の順序と熱伝導率の大きさの順序は、共に、アルゴン $<$ 窒素 $<$ 二酸化炭素 $<$ ヘリウムであり、一致している。

燃焼の3要素は、可燃物、酸素、温度であり、温度が下がれば火は消える。基本的に、酸素以外の気体の消火に関する役割は、火から熱を奪うことである。少なくとも、今回の実験結果は、気体の熱伝導率と実験結果の関係は調和的であり、消火のしやすさは、熱伝導率の違いを大きく反映したものであると考えることができる。

5. 最後に

集気びんなどでは、蓋を開けた時点で、外気との混ざり合いが起こってしまう。そもそも、所定の組成の気体を封入することさえ困難である。今回開発した実験装置では、空気より軽く、蓋を開けた途端に外に逃げてしまうヘリウムでも実験が可能である。高校や大学の基礎科目に

においても、気体の熱容量と熱伝導の違いを学ぶ実験教材として効果的と考える。今後、本装置による実験が、燃焼現象に対する正しい理解の促進・定着に繋がるかを検証したい。

また、筆者らは、最近、小学生や大学生を対象に燃焼現象に対する理解度の種々の調査を行ったが、大学生でさえ、「密閉された空間で燃焼していたろうソクが消えた後の密閉空間内における気体の酸素濃度は0%である」と回答するなど、高校段階の教育を経ても、燃焼現象の理解は進んでいないことが伺えた。誤概念の解消が進んでいないのは、日本の教育課程における燃焼現象の系統的取扱い、構造化が不十分であるためとも考えられる。燃焼に対する正しい概念の形成には、効果的な教材の開発に加え、教育課程上の課題について調査・研究することが必要であろう。

参考文献

- 1) 該当課題の調査結果は、以下のホームページにある。
<http://timssandpirls.bc.edu/timss1995i/TIMSSPDF/BSciChp3.pdf>
- 2) 松原静郎、理科の教育、48 (6) (1999)、pp.56-59.
- 3) 中山迅、大場裕子、猿田祐嗣、科学教育研究、Vol.28、No.1 (2004)、pp.25-33.
- 4) 齋藤美和、福島正悟、金子彩、片平克彦、日本理科教育学会全国大会要項、第53号、p.362.
- 5) 寺田光宏、菱田美歩、岐阜聖徳学園大学紀要〈教育学部編〉、第53集、第66号 (2014)、pp.155-165.
- 6) 「二酸化炭素消火設備の安全対策について (通知)」、消防予第193号、消防危第117号.
- 7) 例えば、M. Suzanne, M.M. Delichatsios, J. Zhang, Fire Safety Science, 10 (2011) , pp.375-387及びその参考文献など。
- 8) D.A. Maciver, Pyrethrum Post, 7 (3) (1964) , p.15-17,19.
- 9) 村山普、京極和旭、井口辰興、小柳幸子、日本農芸化学会誌、44 (2) (1970)、pp.77-82.
- 9) 日本化学会編「化学便覧 基礎編Ⅱ」第4版 丸善 (1993)、pp.233-234.
- 10) 日本化学会編「化学便覧 基礎編Ⅱ」第4版 丸善 (1993)、p.II-66.
- 11) D. Robert, J. McCarty, J. Phys. Chem. Ref. Data, 2 (4) (1973) , pp.923-1041.