

身近な材料を用いた圧気発火器の製作と瞬時現象実験

Instantaneous Phenomenon Measurement and Demonstration of Adiabatic Compression Process by Gas Ignition Device

2017年12月20日（水）

大島商船高等専門学校 内燃機関実験室

専攻科2年 古川幸之介（指導教員 川原秀夫）

1. はじめに

高専の機械工学科および商船学科の学習内容の中に、エネルギー変換工学についての項目があり、内燃機関をその題材として取り上げることがある。高専で内燃機関を扱う場合は、最初にガソリン機関を扱うことが一般的で、その応用発展としてディーゼル機関などを学習する。ガソリン機関では、混合気を点火装置により爆発・燃焼させるので、その仕組みは理解しやすく、指導に用いる教具も多い。しかし、ディーゼル機関などの圧縮点火機関では、空気を圧縮すると温度が上がるという概念を熱力学という学問を通じて学んでいるが、その仕組みを感覚的・体験的に理解させることは比較的困難である。

ディーゼル機関は1893年にドイツのルドルフ・ディーゼルによって発明されたもので、空気のみをシリンダ内に吸い込み、燃料の発火点より高温になるまで圧縮を行う圧縮点火機関である。ディーゼル機関の特徴は他の内燃機関に比べて熱効率が高く、軽油や重油などの安価な燃料が使用できることである。構造上の特徴は、気化器や点火装置を必要としない代わりに、燃料噴射ポンプと燃料噴射弁が必要である。ディーゼル機関では、圧縮の最終段階での空気温度は、500～900℃に達する。

そこで、高専生がエネルギー変換工学の授業でディーゼル機関を学習に利用する観点から、圧気発火器（空気を短時間に圧縮すると、高温になることを、体験を通して学習する教具）を改良し、実験授業でその学習効果を調べた。図1は圧気発火器内部の爆発の様子を示す。また、実験授業では、ガソリンを直接シリンダ内に噴射する直噴点火機関も、近年において普通自動車に搭載されるようになってきた背景を踏まえ、圧縮点火機関の応用として、これらも取り上げた。圧気発火器は内部で起こっている現象を分かりやすく視覚的に体験できる教具であるが、シリンダ内部で起きている物理現象を計測した報告例は見当たらない。したがって本報告では、圧気発火器内部の可視化と瞬間的な物理現象の計測を行い、実際の現象をどの程度捉えることが可能であるかについて検討した。

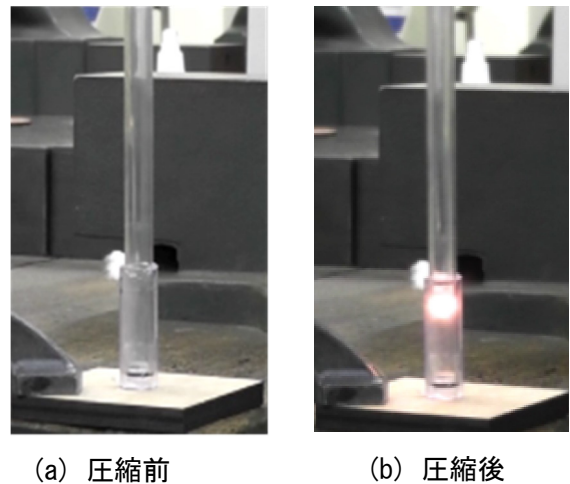


図1 圧気発火器による爆発の様子

2. 圧気発火器の製作

圧気発火器は、気密性のあるシリンダ内に脱脂綿や紙切れ等の可燃物を入れ、短時間にピストンで空気を圧縮・高温化して、その可燃物に火を点ける教具である。その原理は、断熱圧縮を利用したもので、高専の物理の「熱とエネルギー」や熱力学の「気体の状態変化」で学習する内容である。この教具は、近年教材メーカーからも販売されるようになり、高等学校の授業で利用されるようになってきた。また、高等学校でこの教具を用いた授業実践者から、教具について様々な改善が提案されている。例えば、シリンダとして用いる材料を硬質のガラス試験管からアクリルパイプ材に変更したものや、円筒パイプにねじ切りを施し、ボルトによって密封するもの等である。しかし、これらの装置は、師範演示することを主目的として製作されていて、ピストンを短時間で押し下げるには、比較的大きな力が必要となる。そこで、従来の圧気発火器による発火を学生自身が比較的容易に体験を通して学習できるものに改善を行った。図2に本教具の主要部品を、図3に本教具の外観を示す。

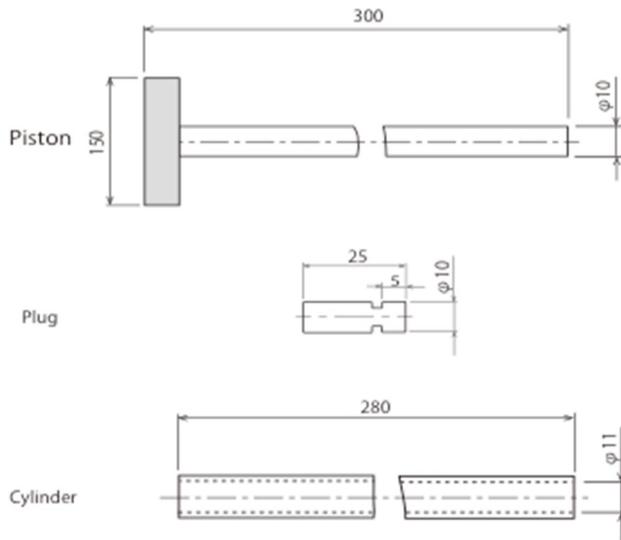


図2 圧気発火器の主要部品



図3 圧気発火器の外観写真

2. 1 改良点

従来の圧気発火器から改良した点は、以下の通りである。

- ① 力の弱い学生でも容易に発火できるようにパイプ内径を小さく設計した。発火の原理は、初期の体積と圧縮された体積の比によって圧縮空気の温度が決まり、圧縮に必要な力はパイプ断面積に比例する。そこで、従来の教具に比べて内径の小さいアクリルパイプを利用し、学生の力でも十分に発火できるようにする。
- ② 従来の教具は、ガラス製もしくはアクリル製の試験管等を利用しており、一端にしか開放口が無かった。気密を保つ場合、このタイプの方が有利であるが、ガス交換や燃焼した可燃物の除去という観点からは、両端に開放口があった方が便利である。そこで、底部にはピストンと同径の真鍮丸棒の外周まわりに溝を加工し、その溝に2つのOリングを取り付けて気密性を保つ栓として取り付けた。このことにより、可燃物の挿入・排出が容易になり、ガス交換も短時間でできるようになった。また、

内圧が上がり過ぎた場合は、この部分から空気を逃がして、シリンダの爆発破損をある程度防ぐ役割も果たしている。

- ③ アクリルパイプが破損した場合、破片が飛び散る危険性があるので、アクリルパイプの外側に、透明のビニールホースを被せ、安全性を確保した。
- ④ 実験を行う際、ピストンとシリンダは垂直に立てて、その状態でピストンを押し込む必要がある。このままだとピストンを勢い良く押し込むと斜めに傾き、非常に危険であるため、シリンダを垂直に固定する治具を製作した。
- ⑤ 入手しやすい安価な材料を用いることと、加工にかかる時間を最小限に止める工程を考え、高専低学年の学生でも製作できるように努めた。材料の原価は、1台当たり1000円前後である。

2. 2 教具の発熱温度

断熱圧縮変化の時の温度と体積の関係式は、温度を T 、体積を V とすると以下のような関係式になる。

$$TV^{\kappa-1}=C \quad (\text{定数：一定}) \quad (1)$$

ここで、 κ は定圧比熱と定容比熱の比 ($\kappa=c_p/c_v$) で比熱比と呼ばれるもので、空気の比熱比はほぼ 1.4 である。初期の温度を T_1 、気体の体積を V_1 、圧縮時の温度を T_2 、気体の体積を V_2 とすると、

$$T_1 \cdot V_1^{1.4-1} = T_2 \cdot V_2^{1.4-1} \quad (2)$$

式 (2) を変形すると、

$$T_2 = T_1 \cdot (V_1/V_2)^{0.4} \quad (3)$$

となる。よって、密閉されたシリンダ部の長さ 150mm を 10mm まで圧縮した時の到達温度の理論値は、 $T_2=866\text{K}=593^\circ\text{C}$ となる。同様に 150mm を 20mm まで圧縮した時の到達温度の理論値は、 $T_2=656\text{K}=363^\circ\text{C}$ となる。ここで、可燃物として用いたティッシュペーパーの発火温度は、 263°C (K 社公表温度) であるので、これを燃焼させるには十分な温度である。また、ティッシュ以外の可燃物であるスチールウール (発火温度: $315\sim 325^\circ\text{C}$)、バルサ材 ($340\sim 440^\circ\text{C}$)、ココア (420°C) も燃焼が確認できたので、シリンダ内部ではこれ以上の温度になっていることが確認された。

3. 圧気発火器の瞬時現象の計測

3. 1 実験方法

圧気発火器内部で起こっている現象を定量的に捉えるため、図 4 に示す計測装置を用いて実験を行った。測定では、圧気発火器内部の温度および圧力を計測した。温度計測には、先ず瞬時変化を捉える必要があることから、熱電対先端部の熱容量を小さくする必要があること、さらには応答性を良くする必要があることから熱電対の素線径 $\phi 50\mu\text{m}$ の K 型 (クロメル-アルメル) 熱電対 (ANBE SMT Co.) を用いた。この熱電対を用いることにより、単純に放熱量は表面積に、熱容量は体積に比例するとして考える

と、従来型の熱電対（ $\phi 200\mu\text{m}$ ）に比べて、熱電対先端部の放熱量は 1/16、熱容量も 1/64 となり、より現実に近いデータが得られると思われる。表 1 は熱電対の素線径の違いによる放熱量と熱容量の関係を示し、放熱断面積と熱容量の容積で比較した。

表 1 熱電対素線径の違いによる放熱量と熱容量の関係

素線径 ϕ	放熱量 A_Q (断面積)	先端部熱容量 V_C (容積)
200 μm	$A_Q = \pi \left(\frac{0.2}{2}\right)^2 = 0.031$ (mm^2)	$V_C = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{0.2}{2}\right)^3 = 4.187 \times 10^{-3}$ (mm^3)
50 μm	$A_Q = \pi \left(\frac{0.05}{2}\right)^2 = 0.002$ (mm^2)	$V_C = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{0.05}{2}\right)^3 = 6.542 \times 10^{-5}$ (mm^3)

一方、圧力計測においては測定対象としているシリンダ内径が $\phi 11\text{mm}$ であるため、一般的な圧力変換器では取付け部の寸法の制約およびセンサー自身が高価であることから、今回の実験では使用することができない。そこで我々は、図 4 の詳細図に示すロードセル (LMC-A-5kN, KYOWA Co.) を用いた。具体的には、シリンダ側面に穴をあけ、そこに気密保持のための Oリングを用い、この部分に $\phi 1\text{mm}$ の SUS 棒をシリンダ内部側面まで挿入する。圧力上昇が発生すれば、この SUS 棒が外部に押し出され、ロードセルによって測定した SUS 棒が受ける荷重を、その断面積で除して圧力に変換した。なお、この方法では SUS 棒と Oリングとの間で生じる摩擦やシリンダ内部の気体の漏れ等により、精密な測定は不可能であるが、現象の傾向を捉えるには有意義な方法であると考えた。測定場所は、シリンダ底部から 20mm の位置に圧力測定用の穴を設け、さらにシリンダ底部から 35mm の位置に熱電対を挿入した。温度および圧力の時系列データは、それぞれ補償回路、計装用コンディショナーを介して、パーソナルコンピュータにてデータ処理を行った。なお、データの取り込み時のサンプリング時間は $10\mu\text{sec}$ である。

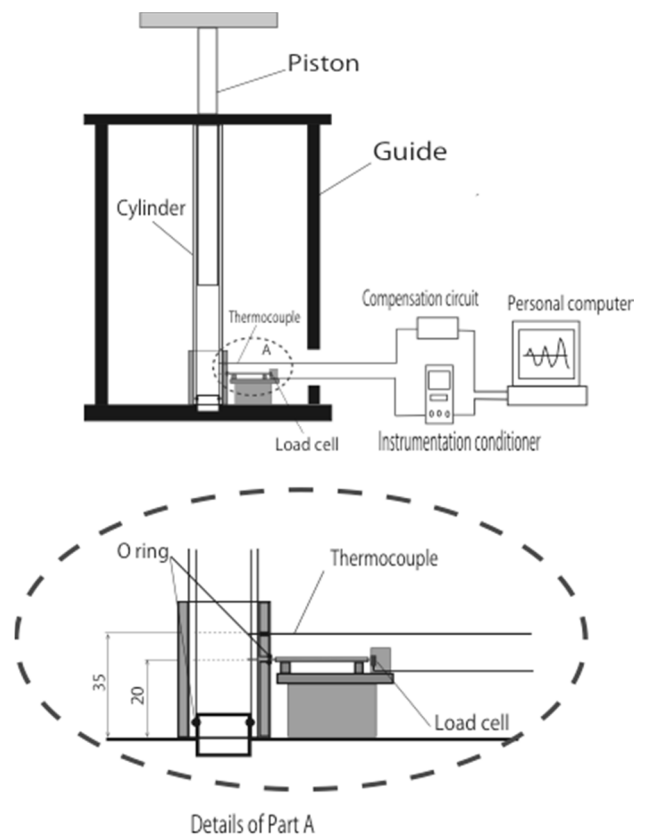


図 4 瞬時現象を捉えるための計測システム

3. 2 実験結果

3. 2. 1 圧気発火器内部の可視化観察

図5は圧気発火器内部の発火前から発火後の様子を示す。発火器内部（シリンダ部）の底にはティッシュペーパーを挿入し、シリンダの底に向かってピストンを力強く押し込む。シリンダ底部にピストンが到達する直前でティッシュペーパーが発火し始めているのが確認できる。この時点でシリンダ部内の温度はティッシュペーパーの発火温度に達したと思われる。その後、ティッシュペーパーは燃え続け、ピストンがシリンダ底部に達して、ピストンを引き上げると今度はシリンダ内が白く濁っているのがわかる。これは、シリンダからピストンを引き上げるにより、圧縮状態から急激に膨張変化に転じ、一気にシリンダ内は冷却され、結露が生じたためであると思われる。

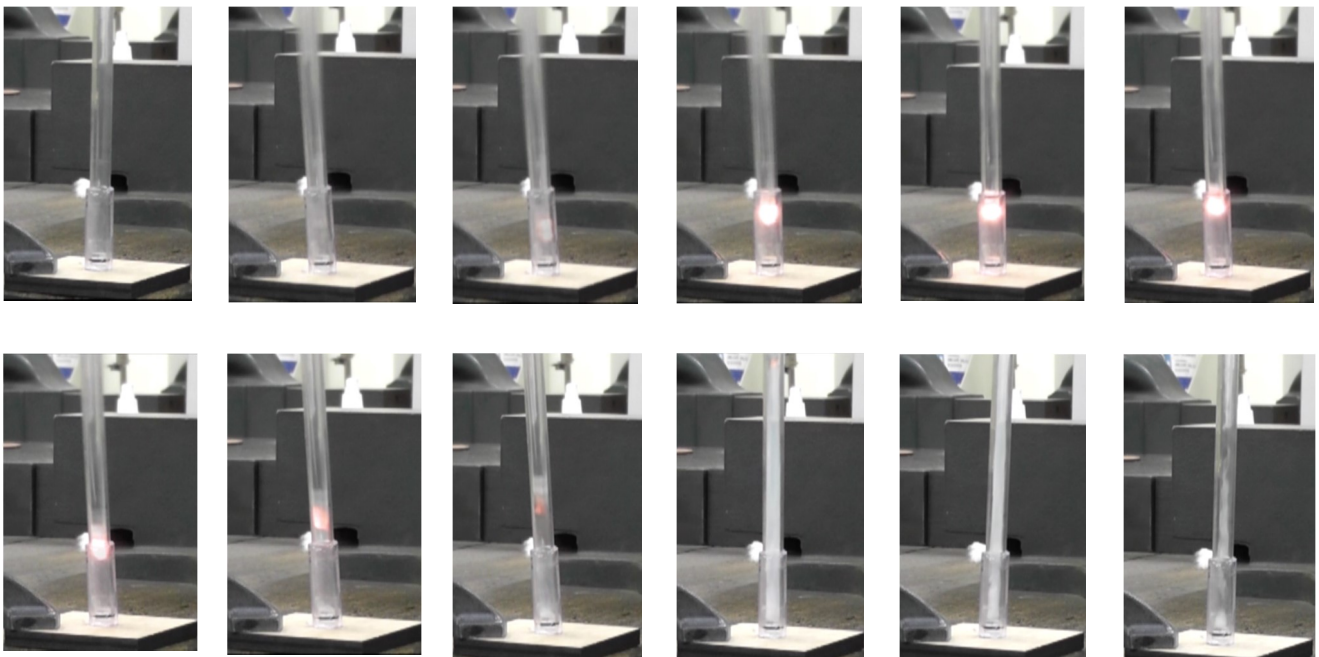


図5 圧気発火器内部の様子

3. 2. 2 圧気発火器内部の瞬時計測

圧気発火器の内部で起きている現象を捉えるため、先ず可燃性物質（本実験ではティッシュペーパーを使用）が入っていない状態について検討した。図6は可燃性物質が無い状態で、ピストンの移動距離 L を60mm、100mm、140mmと変化させた場合のシリンダ内部の瞬時温度変化を示す。ここで、ピストンに加える力は人の手を使って、図3に示すようにピストン端部に取り付けた塩ビ管のハンドルを握り、下に押し込むようにしている。加える力が全て同じになるように各々の条件を3回ずつ行い、平均した値をグラフにプロットした。ピストンの移動距離 L が長くなるにつれて（すなわち、圧縮比が大きくなること）、シリンダ内部の最高温度が高くなる傾向は、上記で述べた断熱圧縮変化の理論値と対応している。また、最高温度に到達する時間はピストンの移動距離の変化によらず、約0.3秒とほぼ一定であることがわかった。その後、最高温度に到達した後は、温度上昇時とは異なり、緩やかな温度低下になっている。一方、圧縮後の温度の絶対値は、理論値に比べて約44%程度、小さな値になっている。この原因として

考えられることは、内部で起きている現象が非常に早いため、熱電対先端部での放熱量の影響やシリンダ内部に存在しているガスの漏洩等による構造上の問題が考えられる。しかし、ピストンの移動距離 $L=140\text{mm}$ 時の最高温度は、可燃性物質であるティシュペーパーの発火点を大きく上回っているため、燃焼するための条件はクリアになっていることがわかった。

図7は、図6と同じ条件におけるシリンダ内の瞬時圧力変化を示す。ピストンの移動距離 L が大きくなるにつれて、最高圧力の値が上昇していく傾向は温度変化の傾向と同じであり、また断熱変化の理論傾向に対応している。しかし、その絶対値は理論値に比べて大きく食い違っている。この原因は、シリンダ内部に存在しているガスの漏洩等による構造上の問題と圧力を測定するために使用した SUS 棒の移動に伴い、Oリングとの摩擦により SUS 棒に作用する力が減衰するため計測方法の問題等が挙げられる。また、圧縮後の圧力値は、急激に0付近まで減少していることがわかる。この原因は、シリンダ内部の圧力が高くなったことで、シール部からのガスの漏洩が主な要因だと考えられる。これらの結果から、温度および圧力値の精度は問題になるが、瞬時現象を定性的に捉えていることが確認された。

次に、シリンダ内部に可燃性物質を挿入した場合について検討した。図8は可燃性物質が有る状態でピストンの移動距離 $L=140\text{mm}$ の時のシリンダ内部の温度変化を示す。なお、図中には可燃性物質が無い状態の値も併記した。圧縮開始後、シリンダ内の温度変化は、可燃性物質の有無に関係なく、ほぼ同一傾向で温度上昇が現れ、約0.3秒付近で 300°C に到達している。その後、可燃性物質が有る状態の温度変化は、可燃性物質の着火によって急激な温度上昇が発生し、約 800°C に到達している。その後、シリンダ内の温度変化は減少傾向に転じて、可燃性物質が無い場合よりも急激に温度が低下していることがわかった。また本実験で得られたこのような温度変

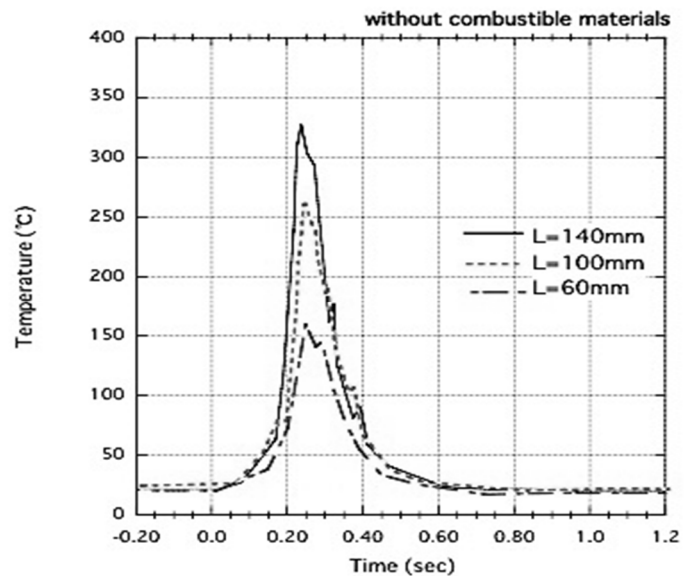


図6 シリンダ内の瞬時温度変化
(可燃性物質が無い場合)

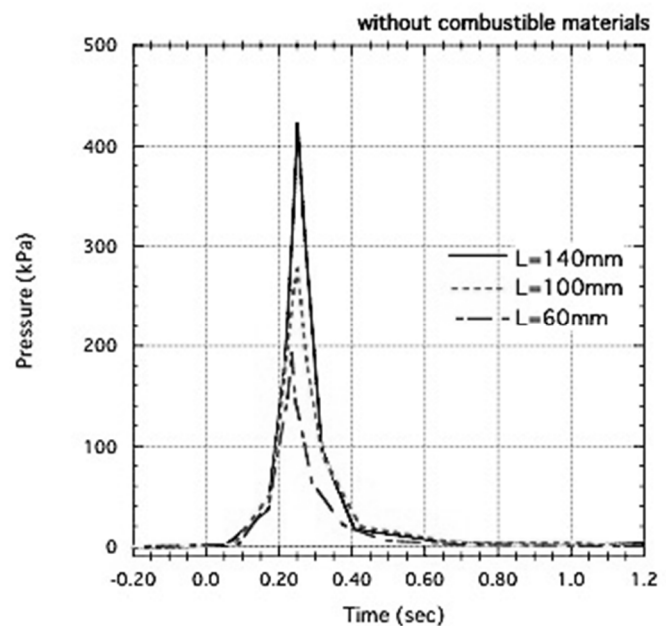


図7 シリンダ内の瞬時圧力変化
(可燃性物質が無い場合)

化は、実際のディーゼル機関のシリンダ内の圧力変化（圧力 P-クランク角度 θ 線図）と同様な変化を示していることから、燃料の着火時期を理解するために重要な知見であることがわかる。

以上のことから、シリンダ内の温度変化を計測することによって、圧縮に伴うシリンダ内の温度変化と可燃性物質の着火による急激な温度上昇を捉えることができた。

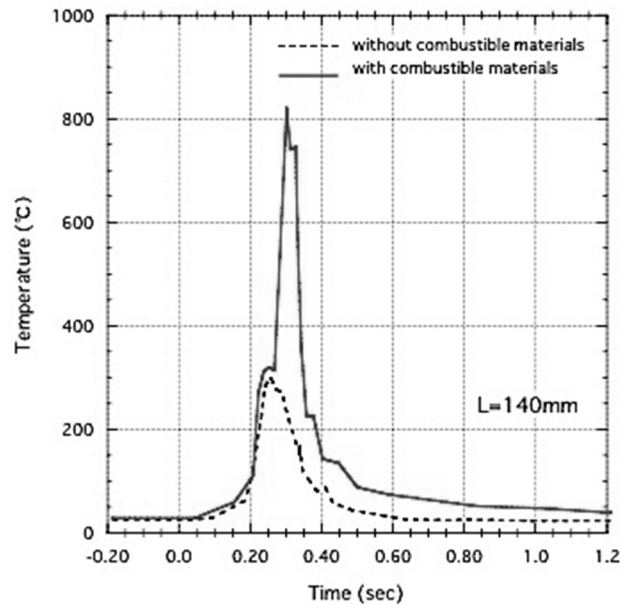


図8 シリンダ内の瞬時温度変化
(可燃性物質の有無による比較)

4. 圧気発火器を用いた授業実践

4. 1 調査対象および学習課題

大島商船高専3年生機関コース21名を対象にして実験授業を行った。学習課題は「ディーゼル機関の仕組みを調べよう」とした。授業の展開は次の通りである。展開1:「ディーゼル機関の仕組みと特徴」、展開2:「ガソリン機関との比較」、展開3:「発火の仕組み」、展開4:「本教具を利用とした発火実験」、展開5:「新しいエンジンの紹介」(直噴エンジン、ハイブリッドエンジン)を設定した。

4. 2 質問項目

実験授業における学習効果を調査するために、質問項目を設定した。授業前にディーゼル機関についての既得知識の程度と、新しいエンジンについての興味・関心を把握するために4つの項目を設定した。また、授業後にディーゼル機関に関する理解の程度を把握するために、別の4つの質問項目を設定した。さらに、新しいエンジンについての興味・関心を把握するために、2つの質問項目を設定した。

4. 3 結果および考察

○ 事前調査による学生の実態

授業前に実施した事前調査の結果、ディーゼル機関という用語は、約65%の学生が聞いたことがある

が、その仕組みを理解している学生は5%以下と少ない。新しいエンジンについての興味・関心も低く、興味があると答えた学生は約30%であった。このことから、あまり深く学習をしていない高専1年生は、用語を聞いたことがあるものの、これらの用語が意味する科学的な概念についてはほとんど形成されていないことが示唆された。

○ 実験授業における教具の効果

実験授業後における学生の本教具に対する感想では、「紙が燃えるほど、温度が上がるとは思わなかった」、「最初は、ピストンを押すスピードが遅いと火が着かないことが不思議に思った」、「空気を圧縮するには、予想以上に大きな力が必要なことが分かった」等と、断熱圧縮を体験的に学習できたという意見が多く出されていた。

アンケート結果から、ほぼ100%の学生がディーゼル機関についての学習が理解できたと答えていることと、新しいエンジンに対する興味・関心が大幅に増加したことから、本実験授業が望ましい形で実施され、所期の学習効果が得られていると判断された。

最後に、この圧気発火器を用いて断熱膨張によってシリンダ内部の空気温度が下がる現象も体験することができる。その様子を図9に示す。通常、雲の発生実験はフラスコなどを使用して行うのが一般的であり、この場合、内部に水や線香の煙などを入れることが多い。しかし、圧気発火器を使用する場合には、圧縮・膨張率が高く、空気だけで雲の発生実験を行うことができる。圧気発火器を使用して、空気を圧縮し、しばらく後に急に膨張させることにより、シリンダ内に白い雲を作り出し、再び圧縮することにより、雲が消えることを見せることができ、学生達の興味をさらに沸かすことができた。



圧縮時



膨張時

図9 シリンダ内に雲が発生

5. 結論

エネルギー変換工学を学ぶ高専生が、圧縮点火機関について体験的に学習する観点で、従来教具として利用されている圧気発火器を改良し、実験授業に用いた。教具の改良のポイントは、女子学生の力でも安全に可燃性物質を着火させることができ、安価で製作可能なこととした。その結果、断熱圧縮による温度上昇（着火）を、実験を通して学習することができた。そのため、圧縮点火機関に関する知識の定着が高まり、また、直噴点火機関などの新しいエンジンに対しても興味・関心が向けられるようになった。さらに、圧気発火器内部で起こっている現象を定性的に捉えることができ、より学習効果を挙げられる方向性を示すことができた。図10は夏休みの公開講座の様子を示す。



図10 小学生を対象にした公開講座

参考文献

- 1) 文部省：中学校学習指導要領（平成10年12月）解説－技術・家庭編－，東京書籍，1999
- 2) 山崎文雄，他：「熱—運動」変換原理説明教具について，日本産業技術教育学会誌，Vol.27, No.1, pp.97-106, 1985
- 3) 矢野利明，他：内燃機関学習用可変圧縮比燃焼容器の試作と熱力学的考察，日本産業技術教育学会誌，Vol.34, No.2, pp.107-114
- 4) 愛知・岐阜物理サークル編著：いきいき物理わくわく実験，新生出版，pp.129, 1993
- 5) 辰口 明：「火起こし」を教材に－圧気発火器の製作と実験・火花式発火法－，徳島県教育センター研究紀要，第83集，pp.61-66, 1995
- 6) 多田幸雄：「圧気発火器の製作と実験」，全国理科教育センター研究協議会ならびに研究発表会物理部会（第32回）研究発表集録，香川1-2，1994