バイオエタノール対応型内燃機関を適用した教育プログラムの開発

Development of Education Program Applying Internal Combustion Engine with Bioethanol as Fuel

内海 能 亜^{*1}
Noah UTSUMI

吉田 昌 史^{*2}
Masashi YOSHIDA

稲田 雄 二^{*3}
Yuji INADA

One of the ways to mitigate global warming is to reduce carbon dioxide emissions. In Japan, carbon dioxide emissions from vehicles, which run on fossil fuels, account for about 1/4 of the total carbon dioxide emissions. In this study, we applied a commercial engine, and remodeled the engine which could work using bioethanol as a fuel. We subsequently examined the influence of exhaust emission of the engine with the bioethanol and documented the entire study as teaching materials, including the remodeling method. Next, we began our mechanical engineering courses at the university by using the teaching materials in this study as introductory education, with the aim of stimulating the interest of the students. We then developed an education program for the students.

Keywords : Engineering Education, Students, Teaching Materials, Bioethanol, Internal Combustion Engine, Education Program

キーワード：工学教育，学生，教材，バイオエタノール，内燃機関，教育プログラム

1. はじめに

近年、地球温暖化による環境問題や化石エネルギーの枯渇問題が多く取り上げられ、持続可能な社会の形成に向けたエネルギー環境教育¹⁾の重要性が高まっている。小・中学校や高等学校では、学習指導要領の総合的な学習の時間で、環境問題やエネルギー問題を取り扱うようになってきている^{2)~4)}。また、高等教育機関では、エネルギー教育地域拠点大学として36校の大学がある。平成14年から、エネルギー教育の普及啓蒙を目指し、小学校・中学校、高等学校、自治体、企業などに対して活動している⁵⁾。

一方、新エネルギーの1つとして挙げられるバイオ燃料は、食料問題がクローズアップされ、食料とならない木質や稲わらなどセルロース系から得られるバイオエタノール⁶⁾や、パームヤシなどによるバイオディーゼル燃料⁷⁾の開発が進められている。バイオ燃料はカーボンニュートラルの観点からクリーンエネルギーとして従来から注目されていた。ところが、近年、植物を育成する時に大量の燃料を必要とするので、CO₂削減とはならないという報告もある⁸⁾。しかしながら、日本の農林業振興による地域の活性化、石油燃料依存や日

本のエネルギー自給率を向上させるために、継続性のあるエネルギーとして、バイオ燃料を教育で取り上げることは意義深いと考える。そして、エネルギー資源の少ない日本にとって、環境教育とエネルギー教育は継続的に実施していかなければならない課題と考える。

また、運輸部門の研究ではバイオマス由来燃料以外に、ハイブリット自動車はもちろんのこと、天然ガス自動車、電気自動車、燃料電池自動車、水素エンジン自動車と燃料が多様化され、新エネルギーの開発と導入が加速している。そして、従来型のガソリンエンジンやディーゼルエンジンをさらに高効率化したエンジンの開発も進んでいる⁹⁾。したがって、当分の間は内燃機関も生産され、ものづくりや環境問題などの教材として内燃機関を教材として取り扱うことは重要なものとする。

さらに、自動車など乗り物を題材としたものづくりに関する教育も多くなされ、導入教育として興味・関心を高め、その教育効果も高いと報告されている¹⁰⁾。ところで、実際の自動車を教育現場で用いれば専門的な設備や大きな施設が必要になる。そこで、多くの教育現場では、構造が簡単なレーシングカートや小型の乗り物、模型などを教材として適用している。例えば、新エネルギーを導入したバイオディーゼルカート¹¹⁾やアルミニウム合金製接着剤によるフレームのレーシングカートの製作¹²⁾などが行われている。しかしながら、

2011年9月15日受付

*1 埼玉大学教育学部

*2 静岡理工科大学理工学部

*3 エナジーファーム(株)

これまでの研究には、バイオエタノールを利用した乗り物または内燃機関の教材について論じた報告はあまり見当たらない。

そこで、新エネルギーとしてバイオエタノールを活用した内燃機関を用い、機械、環境およびエネルギーに関する教育プログラムを開発することとした。これまでに、筆者らは市販されている産業用エンジンや自動二輪車を高濃度エタノールで稼働させ、これを教材として授業を行ってきた。大学の工学部では機械工学の導入教育として興味・関心を高める目的で実施してきた¹³⁾。また、中学校技術科の教員養成大学では、バイオエタノール対応型内燃機関とその補助教材を作成した¹⁴⁾。さらに、卒業研究で製作したスポーツカーを適用し¹⁵⁾、中学校技術科の教員として必要である機械技術の基礎を学習させた。これらの結果から、教育の効果を調査し環境とエネルギー教育を組み合わせた教育プログラムを検討したのでここに報告する。

2. エタノール対応型内燃機関

2.1 エンジン

エタノール燃料（エタノール100%：E100）の場合、図1に示すような4ストロークサイクルエンジンを選択する必要がある。2サイクルエンジンでは燃料とエンジンオイルを混合するため、有機溶媒としてのエタノールとエンジンオイルを混合すれば、オイルの粘度を下げ、エンジンの寿命を縮めてしまう恐れがある。4サイクルのエンジンオイルはエンジン下部のオイルパンに溜まっており、基本的に燃料噴射領域と分離しているため、エンジンオイルの劣化が抑えられる。したがって、本件では4サイクルエンジンを採用した。

2.2 キャブレター

電子制御により燃料と空気量を調整する装置がインジェクションで、ベンチュリや負圧を利用しメカニカルに混合気を噴射する装置がキャブレターである。ここでは、表1のようなガソリンとエタノールの性質を理解させるために、また、エンジンパーツの分解組立

図1 2サイクルと4サイクルエンジンの概略¹³⁾

および追加工などを実習で体験させるために、キャブレター方式のエンジンを採用した。表よりエタノールの特徴は発熱量が低いので、ガソリンに比べおよそ1.7倍燃費が悪くなることがわかる。また、引火点が高いため、氷点下ではエンジンがかかりにくくなる。

2.3 燃料噴射ジェット

燃料はキャブレター内にあるジェットと呼ばれるノズルから噴射される。パイロットジェットはエンジンのアイドリングから低速走行時の燃料供給ノズルである。また、メインジェットは中速から高速走行時の燃料供給ノズルである。エタノール燃料の理想空燃比はおよそ9とされている。ガソリンの理想空燃比の15から変更する場合には、パイロットおよびメインジェットの穴面積を大きくする必要がある。

小排気量エンジンではジェットの穴径は非常に小さく、また、一般的に穴径が製造企業から公開されていないので、実際の寸法を測定する必要がある。ノギスやマイクロメータでは測定できないので、読取顕微鏡や投影機などで測定する必要がある。測定結果からガソリン用ジェットの穴面積を求め、これを15/9倍し、そこから穴を拡大するドリル径を決める。そして、ピンバイスと適切な径の精密ドリルを用いて穴に追加工する¹⁴⁾。

表1 エタノールの性質¹⁵⁾

燃 料	エタノール	ガソリン
分子式	C ₂ H ₅ OH	C ₈ H ₁₈ *
比 重	0.79	0.7
理想空燃比 (空気kg/燃料kg)	9	15
発熱量 (kcal/kg)	6400	10800
オクタン価	106	100
発火点 (℃)	420	275
引火点 (℃)	14	-43
沸 点 (℃)	78.3	99.4

*ガソリンの代表的な分子式（イソオクタン）

図2 燃料系統のホース類

2.4 ホースとタンク

エタノールは溶媒であるため高純度の金属やゴム類を腐食させる性質があり、燃料が通る部品の材質の選定に注意が必要である。そこで、図2に示すような燃料タンクからキャブレターまでの燃料系統部品に変更した。燃料用タンクはフッ素樹脂容器、ゴム系ホースはシリコン製ホースに変更し、そして、燃料フィルターと燃料ストップ用のコックを設けた。

3. 授業で適用する装置と燃料

3.1 産業用エンジンと原動機付自転車

大学の授業で適用したエンジンは、市販されている富士重工業製ロビンエンジンEH12 (121cc) を適用した。また、SUZUKI製原動機付自転車のチョイノリ (49cc) を適用した。いずれも比較的安価に購入できる。産業用エンジンはジェット穴径の追加工で済むが、原動機付自転車ではエアースクリューやアイドリング回転調整用スクリューなどの調整が別に必要となってくる。たとえば、エタノール用メインジェット $\phi 0.7$ 、パイロット $\phi 0.5$ 、スタータ $\phi 0.4$ とした場合、エアースクリューは完全に締め切り、アイドリング用のスクリューはアイドリングが一定となるよう微調整しなければならない¹³⁾。チョークも適宜調整が必要である。これらの調整は気候に影響し、また、ジェットの穴径に

図3 製作したスポーツカート

図4 試乗の様子¹⁵⁾

よって変化し、経験を必要とする作業となる。したがって、授業時間が多く設けられる場合や経験のある学生に実習をさせる場合は原動機付自転車を適用し、そうでない場合は産業用エンジンを適用する。

3.2 スポーツカート

卒業研究で学生が製作したスポーツカートを図3に示す。アルミニウム合金の角管 (角管断面高さ30×幅30×肉厚3mm) に曲げと溶接を施し自作のフレームとした。市販の鋼管フレームに比べ質量が7.5kg軽減され、フレームのみで44%軽量化させた。エンジンはSUBARU製EX21D (211cc) で、クラッチは遠心クラッチを採用、エンジン回転数2000rpm付近でつながり、最高出力は5.1KW (7.0PS) /4000rpmとなっている。ギヤ比は3.95, 最高速度は4000rpmで理論上55km/hとなる。本スポーツカートは学生の興味・関心を引くために実習の導入部で適用した。実際にバイオエタノール燃料でエンジン始動させ、図4のように希望する学生に試乗させ、エタノール燃料による排気ガス臭が、ガソリンの場合と異なることを確認させる。

3.3 排気ガス測定器

日本の自動車の排気ガスにおいて、CO, HC, NO_x, SPMが規制されているので、これらを主に測定対象とした。測定器はガス検知器・検知管 (ガステック社製) を適用した。内燃機関からの排気ガスは高温となるため、ホットプローブも適用した。ガス検知器は取扱いが比較的簡単で、教材用に適していると考ええる。他に、エタノール、ガソリン、ベンゼン、ホルムアルデヒド、トルエンなど測定対象とした。

これまでに測定した内燃機関の排気ガス測定範囲を表2に示す。ガソリン、エタノール燃料ともに対応する測定範囲となっている。ガス濃度は1ppm~100%と測定値が広範囲におよび、ガス検知管はその測定範囲が細かく分かれているため、測定範囲の目安が必要となる。ただし、表2の測定範囲は測定した気候や環境にも影響し、すべての内燃機関に適合するものではない。また、ガス測定は、測定者が中毒を引き起こす場合も考えられるため、その危険性を十分説明し、安

表2 排気ガスの測定範囲

気体名	化学式	測定範囲
一酸化炭素	CO	1 - 50%
二酸化炭素	CO ₂	0.5 - 20%
窒素酸化物	NO	2.5 - 200ppm
	NO ₂	2.5 - 200ppm
低級炭化水素	C ₂ -C ₇ (HC)	0.05 - 2.4%
トルエン	C ₆ H ₅ CH ₃	1 - 100ppm
二酸化硫黄	SO ₂	0.05 - 10ppm
ベンゼン	C ₆ H ₆	2.5 - 120ppm
ホルムアルデヒド	HCHO	2 - 100ppm
ガソリン	C _n H _m	0.015 - 1.2%
エタノール	C ₂ H ₅ OH	0.01 - 7.5%

全を確保した上で測定を行う必要がある。したがって、測定は換気が十分されている場所で行う必要がある。

3.4 燃料

燃料は市販されているレギュラーガソリン(ただし、E3ではない)、試薬一級99.5%エタノール、飲料用のウオッカ“スピリタス”アルコール度数96%のお酒を、バイオエタノール燃料として適用した。他に、試薬エタノールを蒸留水で薄めたエタノール濃度80～99.5%のエタノールを適用した。

4. 教育プログラム

バイオエタノール対応型内燃機関を適用した授業の科目名を表3に示す。大学の工学部機械工学科では主に機械工学や卒業研究の導入教育として、他の学科ではエネルギーの効率的循環を考えさせるエネルギー教育として実施してきた¹⁶⁾。教育学部において、中学校の技術科の教員を目指す学生は、機械技術に関する実習の単位(通年2単位実習を含む)を取得しなければならない。現在、授業科目名「機械技術の基礎」で行っている本件に関する授業内容を表4にまとめる。

これまでの研究結果では、実習時間を多く設けると、環境問題と本実習との関連付けがなされずに、環境問題に対する興味・関心が薄れることを明らかにした¹⁴⁾。また、図5のように、学生は新エネルギーに対して興味があるものの、新エネルギーに関する知識は不十分

であるとアンケート調査で明らかとなった。したがって、このような知識不足を補う新エネルギーに関する解説書(以降補助教材)を適用して、第1回目の授業で説明時間を取っている。この補助教材の内容は①エネルギー教育について(エネルギー教育とは、学校が目指す教育目標、エネルギー概念の認識)②エネルギー問題と現状(石油、その他の枯渇エネルギー)③新エネルギー(バイオエタノール、太陽光発電、太陽熱利用、風力発電、雪氷熱利用、地熱発電)の計14頁からなる解説書である。また、表4の組立手順書は大きく分けて①エンジンの仕組み②エンジンの分解組立(工具の使い方含む)③バイオエタノール仕様への変更方

図5 新エネルギーに関するアンケート結果

図6 実験および実習の様子

表3 授業科目名

開講年度	授業科目名	年次	対 象
H18～20年度	機械工学基礎ゼミナール	1	工学部機械
H19年度	一芸育成(技術と産業化Ⅱ)	2	工学部全体
H18～19年度	機械工学ゼミナール	3	工学部機械
H17～20年度	卒業研究	4	工学部機械
H21年度～	機械技術の基礎	2	教育学部
H21～22年度	卒業研究	4	教育学部

表4 「機械技術の基礎」の授業内容

回数	授業内容	授業形式／教材など
1	スポーツカートの試乗または見学	体験／スポーツカート、産業用エンジン、バイク、各燃料
	ガソリンとエタノールによる排気ガスの臭気確認	
	環境問題、温室効果ガス、エネルギー問題、バイオエタノール、日本と世界	
2+3	エンジンとキャブレターの仕組み	説明／組立手順書、産業用エンジン、工具、補助教材
	工具とジェットの改造方法の説明	
	燃料系統の分解組立、動作確認	実習／組立手順書、産業用エンジン、工具、読取顕微鏡、精密ドリル・ピンバイス、ガス検知器および検知管、各燃料
	ジェット穴径の測定、ジェットの改造	
	各燃料による排気ガス測定	
4+5	小型エンジン22.2ccの分解組立(ロビンエンジン組立キットECO2EHR形2サイクル)	実習／教材用小型エンジン、工具、付属の取扱説明書
宿題	レポート	実習のレポートおよび課題

法④地球温暖化の解説書で、何れの解説書も筆者らが制作したものである¹⁵⁾。

第2～3回目の授業では実習・実験が主となり、図6に示すように学生が熱心に燃料系統部品の分解作業、実験に取り組んでいることが確認できる。作業は2～4人を1グループとしている。近年では、一般的な工具類にあまり触れたことのない学生も少なくはないので、工具の使い方の説明にも時間を取る必要がある。

排気ガス測定の実験では、ガソリンとバイオエタノール燃料を比較させる。図7は過去に学生がガス検知管にて測定した窒素酸化物の一例である。エタノールの場合、実験結果では窒素酸化物が少なくなる場合が多い。また、炭化水素や一酸化炭素は、ジェットの追加加工による穴径が適切ではないために不完全燃焼を起こし、ガソリンの方が少なくなる場合が多い。

この他の実験に表5のようなエタノール濃度によるエンジンのかかり具合を調査させる内容も検討した。エタノール濃度93%よりエンジンがかかり難くなり、走行ができなくなることがわかる。ここでは学生に対して、エタノール濃度の選択と調製、そして、チョイノリの走行の可否を確認させた。したがって、あらかじめエタノール対応型内燃機関を整備しておけば、学生にとって比較的作業が簡単で安全にできる。

5. 教育効果

授業後に実施したアンケート結果を表6に示す。平成18～23年度に本授業を受講した工学部学生の回答数は10名、教育学部の学生の回答数は46名で計56名(男

性38名、女性18名)となった。学部間の授業内容に大きな相違はなく、アンケート結果においても学部間の大きな違いは見られなかったので、結果を合わせて記すこととした。

質問1の環境・エネルギー問題について興味を持つことができたと答えた学生は96%と高い値を示した。質問2では、自動車や環境・エネルギーに関する日常のニュースなどの記憶を調査したもので、その結果が30%と少ない。そこで、30%の者に覚えている内容を記述させたところ、その全てがエネルギーについて記述していた。したがって、本授業以外でもエネルギーに興味・関心を示しているものと判断できる。

質問3～6では本授業に対する学生の評価である。授業時間、設備、資料などについて、80%以上の者が満足しており授業の評価としておおむね良好である。満足していない学生の意見として、4人のグループで作業を進めるとエンジンにさわる時間が少なくなることや、じっくりと理解しながら実習を進めたいとあり、授業内容に対する否定的な意見ではなかった。また、授業難易度について40%の者が難しいと答えた。その理由の大部分が、これまでに工具を扱ったことがないことや高校で物理を専攻していないため専門用語の把握ができなかったためと記述されていた。

その他、本授業に関して率直に思ったこと、感想、改善してほしいことを自由記述させた。アンケート回答数56名中の89%が記述していた。その記述内容を図

図7 窒素酸化物の濃度比較 (チョイノリの場合)

表5 エンジン始動に及ぼすエタノール濃度の影響¹³⁾

種類	濃度 (%)	エンジン始動	走行
試薬エタノール	99.5	○	○
スピリタス	96	○	○
試薬エタノール + 蒸留水	96	○	○
	95	○	○
	93	× or ○	×
	90	×	×
	80	×	×

表6 教育効果と授業評価

No	質問内容	YES	NO
1	講義を受けたことによって環境問題やエネルギー問題に興味を持つことができた	96%	4%
2	講義で学んだ内容に関連したニュースや記事を見聞きして覚えている	30%	70%
3	講義および実験を行う時間は満足できる長さであった	89%	11%
4	実験するための設備が満足に整っていた	79%	21%
5	講義資料には満足できた	89%	11%
6	この講義の内容や実習・実験は難しかった	40%	60%

図8 アンケートによる自由記述の内容

8のように大別した。エンジンと環境・エネルギーに関するコメントは53%で、全体の半分以上を占める結果となった。これらのコメントから、自動車のエンジンの仕組みやその排気ガスが環境に与える問題や枯渇エネルギー問題を認識し、そして、環境問題やエネルギー問題に興味関心を持ち、各種新エネルギーを挙げ、その重要性にふれていることが確認できた。

6. まとめ

平成17年度より市販の内燃機関をエタノール燃料で稼動できるように変更し、これを教材として、翌年度より授業を開始した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 教材としてのE100で稼動できる産業用エンジン、原動機付自転車、スポーツカーを開発した。
- (2) エタノール対応型エンジンを用いた教育プログラムを提案した。実習では燃料系統部品の変更方法を記した組立手順書を作成し、学生らに分解組立および追加工などの作業をさせ、機械工学の導入教育を行った。実験ではガス検知管によるガソリンおよびエタノール燃料の排気ガス測定、内燃機関の始動性に及ぼすエタノール濃度の影響の調査を提案し、実験による環境やエネルギーを題材とした教育を実施した。
- (3) 実習時間を多く設ければ、機械やエンジンに関する興味関心が高まる。しかしながら、環境問題やエネルギー問題に関する興味・関心が薄くなるので、実習とあわせて環境・エネルギーについて解説した補助教材を用いた教育内容を提案した。
- (4) アンケートにより、本教育プログラムは学生に対して興味・関心を持たせることができることを明らかにした。また、内燃機関を使って、環境問題やエネルギー問題を認識させ、新エネルギーの重要性も認識させることができた。

参 考 文 献

- 1) 佐島群巳, 高山博之, 山下宏文(編): エネルギー環境教育の理論と実践, 国土社, pp.132-142, 2005
- 2) 文部科学省: 小学校学習指導要領解説 総合的な学習の時間編, pp.34-38, 2008
- 3) 文部科学省: 中学校学習指導要領解説 総合的な学習の時間編, pp.34, 2008
- 4) 文部科学省: 高等学校学習指導要領解説 総合的な学習の時間編, pp.39, 2009
- 5) 東 之弘: エネルギー教育地域拠点大学の取り組み, 日本エネルギー学会誌, 88-1, pp.15-21, 2009
- 6) 蓮池 宏: 運輸部門の燃料多様化に資する技術の技術戦略, 日本エネルギー学会誌, 87-1, pp.18-24, 2008
- 7) 合田 真: 拡大するバイオディーゼルマーケット

における現状と課題と弊社の取り組み-みどり油田の作り方-, Bio Fuel World ビジネステクニカルセミナー予稿集, pp.163-195, 2007

- 8) 小木知子: 平成21年における重要なエネルギー関係事項, 日本エネルギー学会誌, 89-8, pp.797-800, 2010
- 9) 玉野昭夫: 自動車の燃費改善技術の動向について, 日本エネルギー学会誌, 87-7, pp.493-498, 2008
- 10) 鳥居修一, 山本光治, 今村康博, 大嶋康敬, 有吉剛治, 田中 茂: グループ型ものづくりによる導入教育プログラム, 平成22年度工学・工業教育研究講演会講演論文集, pp.178-179, 2010
- 11) 滋賀県立大学工学部エネルギーと動力研究室: バイオディーゼル燃料のエンジンシステム適合性と利用に関する教育・研究, Webページ, <http://www.mech.usp.ac.jp/~prw/subjects.html>, 2011, 参照日: 2011-9-13
- 12) 大阪教育大学技術教育講座機械研究室: 接着構造によるカート, Webページ, <http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~gijutsu/imanaka/index.html>, 2011, 調査日: 2011-9-13
- 13) 内海能亜, 中村格芳, 渡邊真彦: エタノール対応型の自動二輪車に関する研究, 埼玉大学紀要教育学部, 59-1, pp.43-50, 2010
- 14) 高信徹寛, 内海能亜, 稲田雄二: バイオエタノールを利活用した内燃機関の教材開発, 平成22年度工学・工業教育研究講演会講演論文集, pp.374-375, 2010
- 15) 内海能亜, 吉田昌史, 稲田雄二, 三瓶繁義, 北澤彰人: バイオエタノールを利活用した教材としてのレーシングカート製作, 埼玉大学紀要教育学部, 60-2, pp.219-226, 2011
- 16) 内海能亜, 渡邊真彦, 中村格芳: 多様な学問領域の体験プログラムの開発, 広島国際学院大学研究報告, 42, pp.27-34, 2009

著 者 紹 介

内海 能亜

東京都立科学技術大学大学院修士課程修了後, 1992年(株)アマダ入社, 1995年アイシンAW(株)入社, 1998年退社後, 同上大学院博士課程2001年修了, 博士(工学), 2001年日産自動車(株)入社, 同年, 広島国際学院大学工学部機械工学科所属, 2009年度より埼玉大学教育学部技術教育講座准教授, 現在に至る。所属学会は日本塑性加工学会など

utsumi@mail.saitama-u.ac.jp