

# Study on efficient utilization of bio-alcohol blend fuels in diesel engines

(ディーゼルエンジンにおけるバイオ系アルコール混合燃料の有効利用に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

エタノールはバイオマスとして製造できることからカーボンニュートラルな液体燃料として注目されており、すでに火花点火ガソリンエンジン用燃料として用いられている。一方、ディーゼルエンジンにエタノールを利用しようとする試みもなされており、着火性が低いためスパークプラグやグロープラグによる強制着火、高着火性燃料との混合、あるいはデュアルフューエル法などが検討されている。特に軽油などの高着火性燃料との混合はエンジン本体に特別な改造を加えることなく利用できるため実用性が高いが、エタノールは高濃度で軽油と混合して用いようとすると相分離を起こすため、多くの場合は少量の混合に留まっていた。また、親水性であるアルコールを疎水性である軽油に混合する方法としてエマルジョン化が考えられるが、無水エタノールと軽油とでは安定したエマルジョンが得られないため、これまではその適用例はほとんどなかった。それに対し含水エタノールは比較的容易に軽油とエマルジョン化できることから、これをディーゼル機関用燃料とすることが考えられる。一方、エタノールと同様にバイオ燃料として注目されているブタノールは軽油と相溶性が高いことからディーゼルエンジンへの適用がより容易であり、エタノールと軽油の混合系にブタノールを添加することでその相溶性を著しく向上できることから、これら三者の混合燃料を利用することが考えられる。この場合、エタノールおよびブタノールは含酸素燃料であることから排気中のスートの低減が期待できるのに加えて、着火性が低いことから予混合化ディーゼル燃焼に対して有利である。一方、アルコールと同様にバイオマスとして製造が可能である植物油も注目されており、ディーゼルエンジンにはエステル化した脂肪酸メチルエステル (FAME) として利用するバイオディーゼル燃料が提案されている。しかし FAME はコストが高いことやグリセリンなどの副産物が過剰に生成されてしまうことが実用の妨げになっており、植物油をエステル化しないで使用できることが望まれている。植物油をそのまま高速ディーゼルエンジンに適用できない理由として、粘度が高いことが挙げられるが、アルコールのような低粘度の燃料と混合することにより利用が可能になるものと考えられる。本研究では以上の諸点に着目し、アルコール-軽油混合燃料あるいはアルコール-植物油混合燃料を過給、排気再循環 (EGR)、およびコモンレール噴射系を有する現在のディーゼルエンジンに適用した際の排気エミッションおよび燃焼特性を検討した。

第一の試みとして、含水エタノールと軽油のエマルジョン化が可能であることに着目し、これをディーゼル燃料とすれば相分離の問題も生じないものと考え、軽油-含水エタノールエマルジョン燃料をディーゼルエンジンに適用した。実験条件としては、パイロット噴射時期を噴霧が燃焼室キャビティ内に入る範囲でできるだけ早期に設定するとともに、圧力上昇率を極力抑えるようにパイロット噴射量を設定した。その結果、含水エタノール-軽油エマルジョン燃料を用い、パイロット噴射量および吸気酸素濃度を適切に設定することにより広い負荷範囲において静粛かつ低 NO<sub>x</sub>・無煙燃焼を実現できた。たとえば水分 20% の含水エタノールと軽油とを同一容積で混合した燃料では過給圧力を 160 kPa とした場合に図示平均有効圧力が 0.8 MPa まで無煙運転が可能であった。その際、含

水エタノール-軽油エマルジョン燃料は軽油よりも着火性が低いため、その利用によりパイロット噴射量の増加が可能になって、その熱発生が上死点側に遅角するとともに、主燃焼の後燃えが減少することで広い負荷範囲で等容度および図示熱効率が向上することが明らかになった。さらに、含水エタノール-軽油エマルジョン燃料を用いることにより、軽油では黒煙の排出が著しい比較的噴射圧力が低い場合や多量 EGR により吸気酸素濃度が低い場合においても無煙運転できる範囲が飛躍的に拡大できた。

次に、植物油とエタノールは相溶性が低く安定した混合燃料が得られないのに対し、ブタノールが混在することにより三者の安定した混合燃料が得られる点に着目し、植物油、エタノール、ブタノール三者の混合燃料にパイロット噴射と高 EGR を適用した際の燃焼および排気特性を検討した。その結果、植物油とアルコールの混合燃料を用いてパイロット噴射量および吸気酸素濃度 (EGR) を適切に設定することにより、高負荷においても静粛かつ低 NOx・無煙運転を実現できることが明らかになった。例えば、植物油にブタノールとエタノールを体積割合でそれぞれ 40% および 20% 混合した燃料では、図示平均有効圧力が 0.9 MPa まで低 NOx 無煙運転が可能であった。植物油にブタノールおよびエタノールを混合した燃料は、着火性が低いため上死点付近でパイロット噴射燃料による予混合化燃焼が起るためパイロット噴射量を増加させることが可能になることに加えて、主燃焼の後燃えが減少することで広い負荷範囲で等容度および図示熱効率が向上する結果となった。また、植物油にブタノールおよびエタノールを混合した燃料は、噴射圧力が低い場合や高 EGR・低酸素雰囲気条件でも無煙運転が可能であった。

次に、エタノールと軽油の相溶性がブタノールを添加することで著しく向上することに着目し、その燃焼および排気特性を検討した。さらに種々の混合割合のブタノール-エタノール混合燃料について、近接した少量のパイロット噴射により得られる同様な熱発生率条件における黒煙の排出特性を検討した。その結果、ブタノール-エタノール混合軽油を用いてパイロット噴射量および吸気酸素濃度を適切に設定することにより、広い負荷範囲において静粛かつ低 NOx・無煙運転を実現できた。例えばブタノールとエタノールをそれぞれ体積割合で 30% 軽油に混合した燃料では過給圧力を 160 kPa (絶対圧力) とした場合に図示平均有効圧力が 0.9 MPa まで無煙運転が可能であった。ブタノール-エタノール混合軽油は着火性が低いため、パイロット噴射による予混合的燃焼の熱発生が上死点側に接近してその量を増加させることが可能になるとともに、主燃焼の後燃えが減少することで広い負荷範囲で等容度および図示熱効率が向上した。さらに、ブタノール-エタノール混合軽油を用いることにより、軽油単体では黒煙の排出が著しい比較的噴射圧力が低い場合や多量 EGR により吸気酸素濃度が低い場合においても無煙運転できる範囲が飛躍的に拡大した。パイロット噴射を行うことで着火性低下の影響を極力排除し運転条件を同一にした場合には、ブタノール-エタノール混合軽油の黒煙はブタノールとエタノールの混合比率にかかわらず燃料中の酸素含有割合の増加に対しておおむね一義的に減少することが明らかになった。

以上本研究により、バイオマスにより製造可能であるエタノールおよびブタノールを軽油あるいは植物油といった高着火性燃料に混合することにより、過給、排気再循環、およびコモンレール噴射系を有する現在のディーゼルエンジンにおいて、高効率かつ低エミッションで利用できることが明らかになった。

## 学位論文審査の要旨

主査	教授	小川	英之
副査	教授	近久	武美
副査	教授	藤田	修
副査	准教授	柴田	元

### 学位論文題名

## Study on efficient utilization of bio-alcohol blend fuels in diesel engines

(ディーゼルエンジンにおけるバイオ系アルコール混合燃料の有効利用に関する研究)

エタノールはバイオマスとして製造できることからカーボンニュートラルな液体燃料として注目されており、すでに火花点火ガソリンエンジン用燃料として用いられている。一方、ディーゼルエンジンにエタノールを利用しようとする試みもなされており、着火性が低いためスパークプラグなどによる強制着火、高着火性燃料との混合、あるいは複燃料供給法などが検討されている。特に軽油などの高着火性燃料との混合はエンジン本体に特別な改造を加えることなく利用できるため実用性が高いが、エタノールは高濃度で軽油と混合して用いようとするると相分離を起こすため、多くの場合は少量の混合に留まっていた。また、親水性であるアルコールを疎水性である軽油に混合する方法としてエマルジョン化が考えられるが、無水エタノールと軽油とでは安定したエマルジョンが得られないため、これまでは適用例はほとんどなかった。それに対し含水エタノールは比較的容易に軽油とエマルジョン化できることから、これをディーゼル機関用燃料とすることが考えられる。一方、エタノールと同様にバイオ燃料として注目されているブタノールは軽油と相溶性が高いため適用がより容易であり、エタノールと軽油の混合系にブタノールを添加することでその相溶性を著しく向上できることから、これら三者の混合燃料を利用することが考えられる。この場合、エタノールおよびブタノールは含酸素燃料であることから排気中のスートの低減が期待できるのに加えて、着火性が低いことから予混合化ディーゼル燃焼に対して有利である。さらに、アルコールと同様にバイオマスとして製造が可能である植物油も注目されており、ディーゼルエンジンにはエステル化した脂肪酸メチルエステル (FAME) として利用するバイオディーゼル燃料が提案されている。しかし FAME はコストが高いことやグリセリンなどの副産物が過剰に生成されてしまうことが実用の妨げになっており、植物油をエステル化しないで使用できることが望まれている。植物油をそのまま高速ディーゼル

エンジンに適用できない理由として、粘度が高いことが挙げられるが、アルコールのような低粘度の燃料と混合することにより利用が可能になるものと考えられる。本研究では以上の諸点に着目し、アルコール-軽油混合燃料あるいはアルコール-植物油混合燃料を過給、排気再循環 (EGR)、およびコモンレール噴射系を有する現在のディーゼルエンジンに適用した際の排気エミッションおよび燃焼特性を検討している。

第一の試みとして、含水エタノールと軽油のエマルジョン化が可能であることに着目し、これをディーゼル燃料とすれば相分離の問題も生じないものと考え、軽油-含水エタノールエマルジョン燃料をディーゼルエンジンに適用している。次に、植物油とエタノールは相溶性が低く安定した混合燃料が得られないのに対し、ブタノールが混在することにより三者の安定した混合燃料が得られる点に着目し、植物油、エタノール、ブタノール三者の混合燃料にパイロット噴射と高 EGR を適用した際の燃焼および排気特性を検討している。さらに、エタノールと軽油の相溶性がブタノールを添加することで著しく向上することに着目し、その燃焼および排気特性を検討している。実験条件としては、いずれの燃料ともパイロット噴射時期を噴霧が燃焼室キャビティ内に入る範囲でできるだけ早期に設定するとともに、圧力上昇率を極力抑えるようにパイロット噴射量を設定している。その結果、いずれのアルコール混合燃料を用いても、パイロット噴射量および吸気酸素濃度を適切に設定することにより広い負荷範囲において静粛かつ低 NO<sub>x</sub>・無煙燃焼を実現できることを示している。その際、各アルコール混合燃料は軽油よりも着火性が低いため、その利用によりパイロット噴射量の増加が可能になって、その熱発生が上死点側に遅角するとともに、主燃焼の後燃えが減少することで広い負荷範囲で等容度および図示熱効率が向上すること、これらアルコール混合燃料を用いることにより、軽油では黒煙の排出が著しい比較的噴射圧力が低い場合や多量 EGR により吸気酸素濃度が低い場合においても無煙運転できる範囲が飛躍的に拡大できることを示している。さらに、パイロット噴射を行うことで着火性低下の影響を極力排除し運転条件を同一にした場合には、ブタノール-エタノール混合軽油の黒煙はブタノールとエタノールの混合比率にかかわらず燃料中の酸素含有割合の増加に対しておおむね一義的に減少することを示している。

これを要するに、著者は現在のディーゼルエンジンにおけるバイオ系アルコール混合燃料の有効利用法に関し新知見を得たものであり、エンジンシステム工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。