

学位論文全文に代わる要約 Extended Summary in Lieu of Dissertation

氏名： 西川 純
Name

学位論文題目： 農用ディーゼル機関の性能試験に関する研究
Title of Dissertation

学位論文要約：
Dissertation Summary

農用車両のうち、機関出力が主に19 kW以上のものに搭載される内燃機関は、一般的に軽油を燃料として使用するディーゼル機関が用いられている。自動車に多く用いられるガソリン機関と比較して、発火点（燃料自体が自発的に発火する温度）が低いため、ガソリン機関のように圧縮させた燃料と空気の混合気体に対して点火装置を用いて発火させる方式ではなく、ピストンにより高圧・高温となったシリンダ中へ燃料を噴射することで点火させる方式であるため、電気による点火接点が必要である。シリンダ内で高く圧縮された高温の空気を一気に爆発させることで、強力なトルクを低回転から得られる特性があり、このことが、低速度・高出力作業が主である農業機械に多く搭載される理由となっている。また、内燃室において、圧縮比（最も容積が大きくなる時の容量と、最も容積が小さくなる時の容量の比率）が大きいため、爆発圧力に耐え得る強固な作りとなっており、耐久性が高いことも特徴である。一方、農用ディーゼル機関から発生する排出ガスは環境に与える影響が大きい。排出ガスの低公害化は長年取り組まれてきた課題であり、今なお多くの研究が進められている。特に、窒素酸化物（以下、NO_x）の排出と、すすや可溶性有機物質などから成る粒子状物質（以下、PM）の排出がトレードオフの関係にあることが、同時低減を困難な課題としている。その理由には、ディーゼル機関はピストンにより圧縮された高温、高圧の筒内に燃料を噴射し、蒸発した燃料が周囲の空気と混合した後に自着火することによって動力を得るが、この際に筒内の燃料蒸気と周囲ガスの混合状態が排出ガス成分の生成に大きく寄与するため、十分に混合が進んだ領域における燃焼では、燃焼温度が高温となり多量のNO_xが生成され、逆に混合が進まずに局所的に燃料が過濃となる領域ではPMが多量に生成されるからである。日本において排出されるNO_xの排出源についてみると、NO_x排出量のうち自動車が占める割合は52%であり、そのうちの81%がディーゼル車由来である。なお、PMについても排出総量のうち自動車が占める割合が43%であり、そのほとんどがディーゼル車を排出源とするものである。つまり、NO_x、PMともに4割を超える量がディーゼル車から排出され、影響度が大きいとわかる。一方、PMについてもディーゼル車の排気管から排出される黒煙に代表されるように、局所的な大気環境の悪化に加え、発ガン性の問題など人体への悪影響が懸念されている。NO_xとPM以外にも、有害な成分として一酸化炭素（以下、CO）と全炭化水素（以下、THC）の排出量が規制されているが、排気後処理装置による低減が容易であるため、ディーゼル排出ガスの低公害化の問題はNO_xとPMの同時低減を解決することを中心に取り組まれている。このように、排出ガス中の有害排気物質の健康や環境などへの影響が懸念される中、2003年10月より、機関定格出力19 kW以上560 kW未満の農業機械、建設機械などのディーゼル特殊自動車に対し、排出ガス規制が開始された。その試験方法として、機関単体で行う「原動機車載出力試験（ディーゼル機関）」（以下、出力試験）及び「ディーゼル特殊自動車8モード法排出ガス試験（ディスクリート試験サイクル）」（以下、排出ガス試験）が用いられており、電気動力計によって機関の負荷率、機関回転数を変化させ、その際の出力、燃料消費量、排出ガス等を測定することとなっている。

出力試験は機関出力軸を動力計に接続し、調速レバーを全開の状態から最高回転速度から最低回転速度まで一定回転数毎の軸出力、軸トルク、燃料消費量を測定する（図1）。試験は十分暖気を行った後、目標回転速度に達してから1分間ほど一定値を保つことを確認した後、各測定値を読み取る。ここで確認された最高回転速度、最低回転速度、定格回転時トルク、定格出力、最大トルク、および最大トルク時回転速度は排出ガス試験の負荷点や試験サイクルを作成する上で必要となり、排出ガス試験実施前に必ず実施する必要がある。

排出ガス試験は、建設機械、農業機械等の特殊自動車に対し、国際的に使用されているISOの試験サイクル（ISO8178-4におけるC1サイクル）と同等であり、機関出力軸を動力計に接続した状態で機

関回転速度、機関負荷率の異なる8つの測定モードにおいてCO、THC、NO_xの排出ガス濃度、PM捕集量、排出ガス流量などが測定され、単位時間当たり排出ガス質量(g/h)(以下、排出量)が算出される。この排出量に各モード毎に定められた実効重み係数(以下、WF)を乗じたものの総和を求め、これを各モードで得られた仕事率に同じくWFを乗じたものの総和で除した値が、排出率(g/kWh)として基準の適否を判断する試験結果となる。排出ガス試験の測定モードをプロットしたものを図2に示す。8つの測定モードは、定格回転速度時における機関負荷率100%、75%、50%、10%の各状態、予め出力試験を行って得られた最大トルク時回転速度に基づき中間回転速度時における機関負荷率100%、75%、50%の各状態、アイドリング回転速度における機関負荷率0%の状態である。試験開始時は機関製造者の指示および適切な技術的判断に基づき、機関を暖機運転する。排出物サンプリングを開始する前に、機関の温度(冷却水および潤滑油)が、モード1(100%トルクおよび定格回転速度)で10分以上安定するまで機関を運転し、機関が安定した後、直ちに試験サイクルの計測を開始しなければならない。各モードは、少なくとも10分間実施する必要がある。各モードについて、5分間以上機関を安定させて、排出ガスについては各モードの最後に1～3分間でサンプリングを行う。ただし、各モードの移行期間は測定の対象外である。

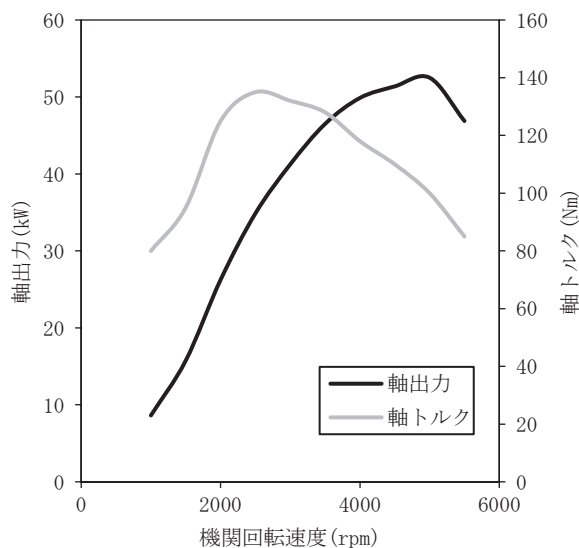


図1 出力試験結果の例

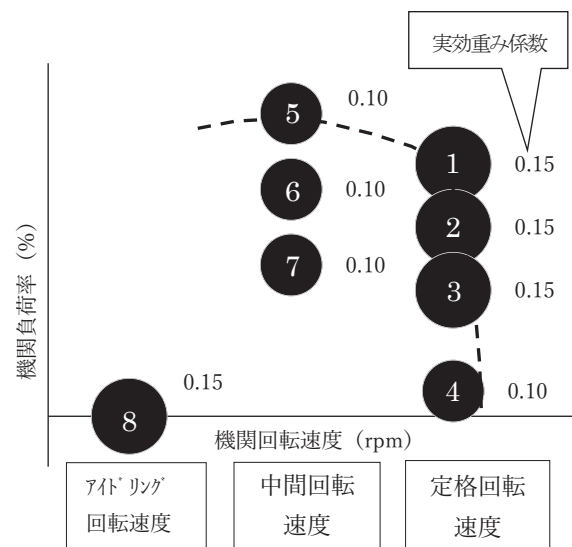


図2 排出ガス試験の測定点

出力試験・排出ガス試験実施にあたっては、各測定装置・設備の方式や応答性・直線性・精度・再現性、軽油の燃料性状、配管、吸入空気等の空調、データ記録方式、試験中の大気条件、試験後の実効WFの検証などが細かく規定されており、すべての項目が基準内に入っていることが、有効な試験条件となる。ここで、試験条件のうち、吸入空気温度、大気圧などの試験時大気環境条件に関する規定を表1に示す。

表1 性能試験時の大気環境条件基準値

出力試験	乾燥大気圧*:80～110 kPa
	吸入空気温度:10～40 °C
	冷却液温度:機関設定温度上限±5 K(指定がない場合は、80±5 °C)
	燃料温度:機関設定範囲内
排出ガス試験	潤滑油温度:機関設定範囲内
	大気条件係数**:0.93～1.07
	吸入空気温度:25±5 °C
	吸気抵抗:指定抵抗最大値±300 Pa (製造者指定の機関回転速度およびトルク点)
	排気抵抗:抵抗最大値の80～100 % (製造者指定の機関回転速度およびトルク点)
	冷却液温度・燃料温度・潤滑油温度: 製造者が定める通常の温度

*大気圧から水蒸気分圧を減じたもの。

**大気条件係数は、自然吸気及び機械式過給機関の場合には式(1)により、排気タービン式過給機関の場合には式(2)により、求められる。

$$fa = (99 \div ps) \times (Ta \div 298)^{0.7} \quad (1)$$

$$fa = (99 \div ps)^{0.7} \times (Ta \div 298)^{1.5} \quad (2)$$

ここで、faは大気条件係数、psは乾燥大気圧(kPa)、Taは機関吸入空気の絶対温度(K)を表す

排出ガス試験特有の指標である大気条件係数は、大気圧、温度などの大気条件が機関の吸入空気量に及ぼす影響を総合的に示す係数である。基準では吸気方式により大気条件係数に与える影響度が異なっており、自然吸気式機関では、排気タービン式過給機関と比較して、大気条件係数は大気圧の影響を受けやすく(図3)、吸入空気温度の影響は受けにくい(図4)。また、燃料温度については、機関毎に最適な温度制御がなされているため、明確な基準値は設けられておらず、「製造者が定める通常の温度」とされている。

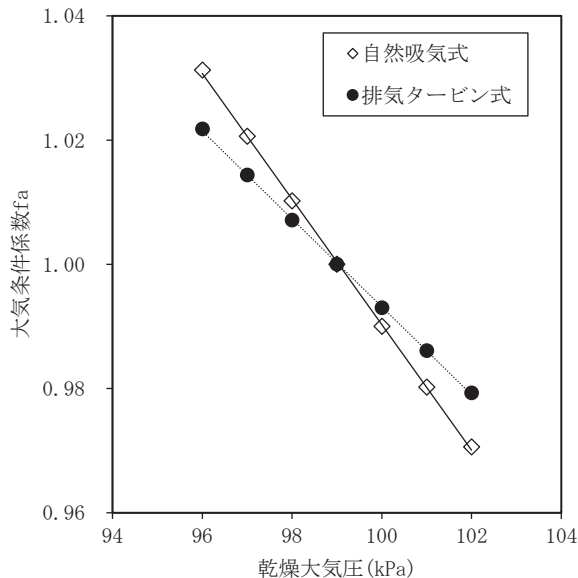


図3 大気条件係数と乾燥大気圧の関係

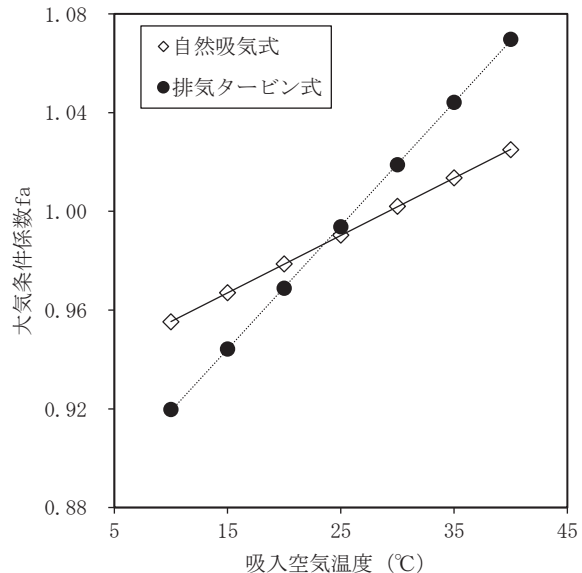


図4 大気条件係数と吸入空気温度の関係

ここで、ディーゼル機関内での主たる燃焼反応は、炭化系水素の混合物である軽油などの燃料と空気中の酸素による燃焼である。空気については、空気温度の上昇や大気圧の低下により空気の密度が低下することが、一方、燃料については、燃料温度の上昇により、燃料の密度や動粘度が低下することが一般に知られており、様々な試験条件のうち、燃料と酸素による燃焼が機関性能に対し最も直接的に影響を及ぼすことが考えられる。そのため、基準で定められている試験条件の範囲内であっても、試験結果に大きく影響を及ぼす可能性がある。これまで、吸入空気温度や燃料温度などの試験環境条件が機関性能に及ぼす影響について調査した研究事例は多くあり、いずれも試験環境条件が機関性能に影響することを実験により明らかにしている。しかしながら、現行の排出ガス試験で用いられる大気条件係数といった指標を基に、その影響を明らかにした研究はない。また、排出ガス試験の合否判定基準である排出率(g/kWh)に与える影響についても調査した例はない。今後、より排出ガス規制が強化されると予想される中、これらのばらつきが試験結果に及ぼす影響は相対的に高くなることが予想されるため、ばらつきの一因と考えられる試験環境条件が、どの程度機関性能に影響を及ぼすかを明らかにすることは重要である。また、その影響が大きい場合は、より試験結果のばらつきが小さい、公正な試験を実施できる手法の検討が必要である。そこで本研究では、農用車両に一般的に用いられている3つの仕様の機関を対象に、吸入空気温度と乾燥大気圧から求める大気条件係数や、燃料温度といった試験環境条件が、機関性能に及ぼす影響を実験により明らかにし、試験環境条件の違いによる試験結果のばらつきが小さい、より公正な機関性能試験を行うための試験手法を見出すことを目的に試験を行った。本試験手法の適用については、現行試験方法や試験基準の変更、また、試験機器の追加や変更を伴わず、一般的な試験設備で実施可能であることを前提とした。なお、本研究では研究開始時(2014年)の排出ガス規制(国内三次規制)の試験方法である排出ガス試験および、出力試験を対象とし、認証試験手順および基準に準拠して試験を行った。

【試験環境条件が機関性能に与える影響】

試験環境条件の違いによる試験結果のばらつきが小さい、より公正な機関性能試験を行うための試験手法を見出すためには、吸入空気温度と乾燥大気圧から算出する大気条件係数や燃料温度などの試験環境条件の違いが、出力や排出ガスといった機関性能に及ぼす影響について、実際の認証試験に用いられる試験方法を用いて調査する必要がある。そのためには、吸入空気温度を制御するた

めの空調機、燃料温度を制御するための燃料温調機がそれぞれ必要であるが、これは、認証試験機関の設備要件となっている付帯設備で実施可能である。

そこで、大気条件係数の算出方法が異なる自然吸気式ディーゼル機関および排気タービン式過給ディーゼル機関の2機関に加え、近年国産農業機械の多くに搭載されているディーゼル微粒子捕集フィルター (Diesel Particulate Filter 以下、DPF) およびディーゼル酸化触媒 (Diesel Oxidation Catalyst 以下、DOC) といった排気後処理装置を装備したコモンレール式ディーゼル機関を供試し、大気条件係数の算出に必要となる吸入空気温度の設定温度を、基準である吸入空気温度20～30℃の範囲を5℃毎に区切った、20℃、25℃、30℃の3水準、燃料温度の設定温度を温調装置の設定可能範囲である35～50℃を5℃毎に区切った35℃、40℃、45℃、50℃の4水準、繰り返しを各3回として出力試験および排出ガス試験をそれぞれ実施し、試験環境条件の違いが機関性能に与える影響を調査した。実験装置の概要を図5に示す。その結果、自然吸気式ディーゼル機関および排気タービン式過給ディーゼル機関においては、大気条件係数の違いが、出力、燃料消費率、PM、NOx、COの試験結果に影響を及ぼすこと (図6、図7)、DPFおよびDOCを装備したコモンレール式ディーゼル機関においては、大気条件係数の違いが、出力および燃料消費率の試験結果に影響を及ぼすこと、自然吸気式ディーゼル機関では、燃料温度の違いが燃料消費量の試験結果に影響を及ぼすことが明らかとなった。特に、排出ガス試験では、自然吸気式ディーゼル機関および排気タービン式過給ディーゼル機関において、同じ条件であってもCO、PMの排出量が2倍程度が異なる場合も確認された。このことから、出力試験や排出ガス試験において、常に変化する乾燥大気圧に対して、大気条件係数が一定あるいは一定の範囲内に納まるよう制御することで、試験環境条件の違いによる試験結果のばらつきを小さくできる可能性が示唆された。

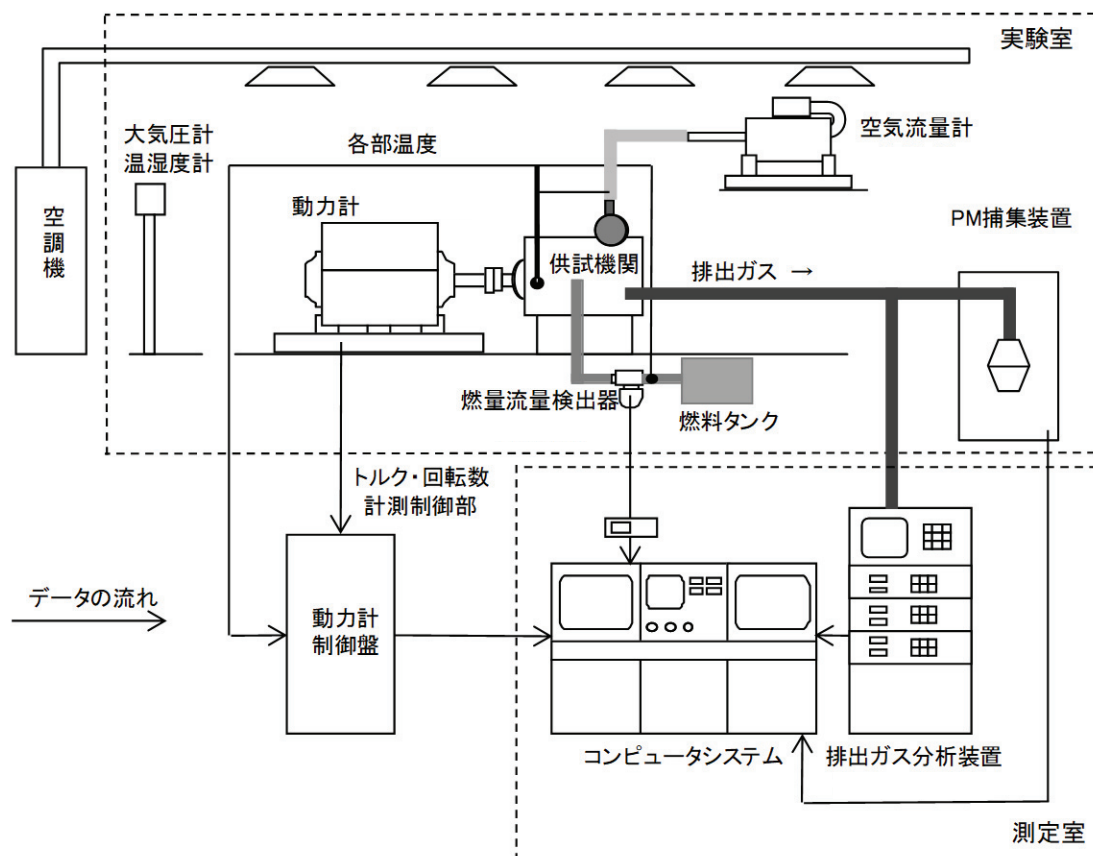


図5 実験装置の概要

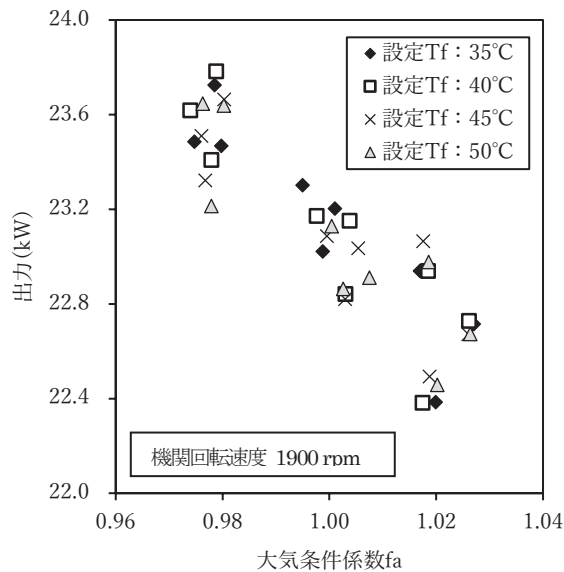


図6 出力試験結果の一例
(自然吸気式ディーゼル機関) Tf: 燃料温度

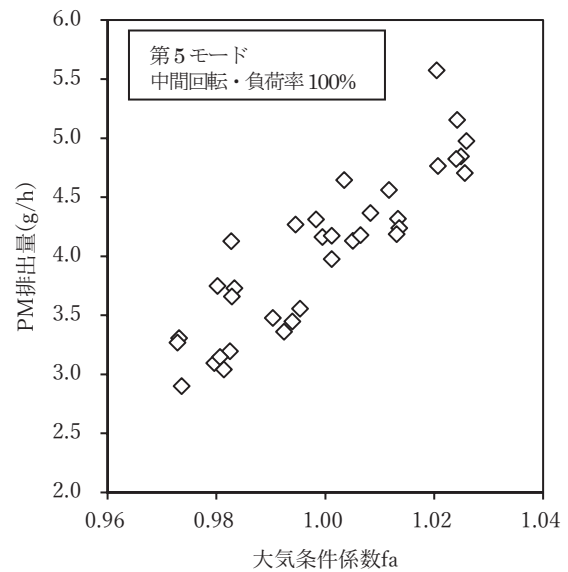


図7 排出ガス試験結果の一例
(自然吸気式ディーゼル機関)

【大気条件係数を一定とした場合の試験結果への効果】

大気条件係数を一定に制御するためには、算出基礎となっている吸入空気温度、あるいは乾燥大気圧のいずれか一方を制御する必要がある。このうち、乾燥大気圧については気象条件によって日々刻々と変化するものであり、これを制御することは一般的な認証試験設備では困難である。また、認証試験においても、大気圧を制御するための付帯設備は試験設備要件に入っておらず、乾燥大気圧を制御して大気条件係数を制御することは現実的ではない。一方、吸入空気温度については、急激な温度変化を抑えるための配管長の最適化や、断熱材の使用など一定の対策を講じることで、空調機を用いて容易に制御することが可能であり、認証機関の付帯設備でも実施可能である。

そこで、吸入空気温度を空調機で制御することで大気条件係数を一定とする試験手法を開発した。大気条件係数を一定とするための設定吸入空気温度算出式は以下のとおりである。自然吸気および機械式過給機関の場合には式(1)により、給気冷却器の有無に関係なく排気タービン式過給機関の場合には式(2)により、それぞれ求められる。

$$Ta = \left(\frac{Ps}{99} \cdot 298 \cdot fa \right)^{\frac{1}{0.7}} - 273 \quad (1)$$

$$Ta = \left(\left(\frac{Ps}{99} \right)^{0.7} \cdot 298^{1.5} \cdot fa \right)^{\frac{2}{3}} - 273 \quad (2)$$

ここで、fa:大気条件係数

Ps:乾燥大気圧(kPa)

Ta:機関吸入空気の絶対温度(K)を表す。

試験時は、乾燥大気圧やモード移行に伴う吸入空気量の増減に応じて、オペレータが手動あるいは自動で吸入空気温度を制御することが可能である。本試験手法を用い、前述した3機関を対象に、出力試験および排出ガス試験を行った際の試験結果のばらつきへの効果を確認した。試験は、大気条件係数をそれぞれ0.988～0.992、0.998～1.002、1.008～1.012の範囲内に納めた大気条件係数0.99一定区、大気条件係数1.00一定区、大気条件係数1.01一定区、また、対照区として、これまで試験を実施する際に設定していた吸入空気温度を25℃一定とした吸入空気温度25℃一定区（基準である吸入空気温度10～40℃の中間値）の計4試験区を設け、出力試験および排出ガス試験を行った。その結果、①出力試験を実施する場合、大気条件係数の違いにより生じる出力、燃料消費率の試験結果のばらつきをより小さくするためには、本試験手法が有効であること（図8）、②排出ガス試験を実施する場合、負荷が大きい第1モード（定格回転速度、負荷率100%）、5モード（中間回転速度、負荷率100%）において、CO、PMは試験結果のばらつきを同程度以下に抑えることができる場合もあるが（図9）、

吸入空気量や燃料噴射量などの機関特性により、ばらつきを小さくできる程度が異なること、③ NO_xは、大気条件係数を一定で試験を実施する場合、常に変化する乾燥大気圧に応じて変化させる吸入空気温度が排出量に影響を与える恐れがあることに留意する必要があることが明らかとなり、本手法は、実用に供しうる可能性が高いことを実証した。

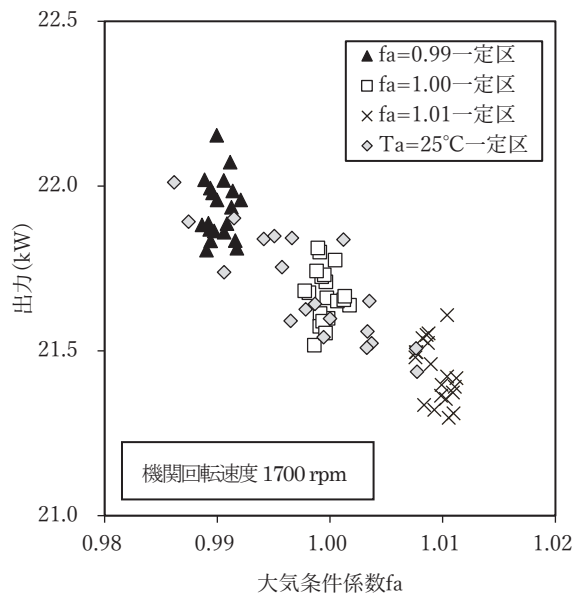


図8 出力試験結果の一例
(排気タービン式過給ディーゼル機関)

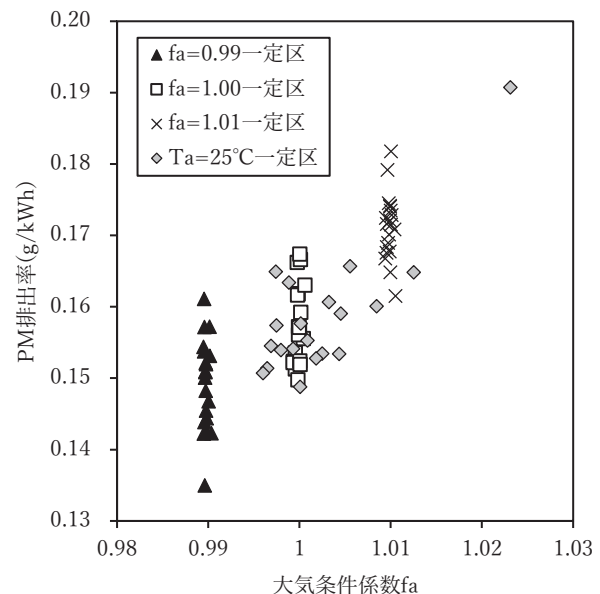


図9 排出ガス試験結果の一例
(排気タービン式過給ディーゼル機関)

【総合考察】

本研究で開発した試験手法は、一般的な認証試験機関の設備として付帯されている空調機を使用して吸入空気温度を制御し、大気条件係数を制御する手法である。そのため、排出ガス試験基準の変更や、新たな試験設備や測定器の導入を伴わず容易に適用可能である。また、本研究開始時には基準となっていなかった、国内四次排出ガス試験方法である Rumped Modal Cycle (RMC)法や、過渡試験である Non Road Transient Cycle (NRTC) 法においても、その効果が期待できる。さらに、ディーゼル特殊自動車の機関単体の性能試験のみならず、農業機械の性能試験の一つである PTO 性能試験や省エネルギー性能試験においても汎用利用が可能である。本試験手法については、国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農業技術革新工学研究センターが実施する農用トラクター(乗用型)等の評価試験制度及び省エネ性能試験に導入することに加え、2017年に日本で開催された世界の農林業用トラクタの試験手法を定める Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) テストエンジニア会議において導入を提案し、国内外への普及を目指している。

残された課題として、本研究では、現行試験方法で規定されている大気環境条件に係る要素を対象としたが、この他、試験方法に規定されておらず、機関性能に影響を及ぼす可能性のある要素として、吸入空気湿度が挙げられる。吸入空気湿度については、大気条件係数の算出基礎とはなっていないため、同じ吸入空気温度であっても水分量の違いにより、機関筒内での燃焼温度や、燃料との混合状態にも影響してくることが懸念され、機関性能にも影響があるものと推察される。本研究では吸入空気湿度に関しては一定条件下で行ったため、その影響について確認することはできなかったが、一つの要素が機関性能に与える影響を確認する一連の流れを示すことができたため、同様の方法にて、吸入空気湿度についても確認が可能であると考えられる。

(注) 要約の文量は、学位論文の文量の約10分の1として下さい。図表や写真を含めても構いません。

(Note) The Summary should be about 10% of the entire dissertation and may include illustrations