

# 自動車用アンモニア混焼エンジンの開発

津田 稔<sup>1)</sup> 石田 雅照<sup>1)</sup> 井原 剛<sup>1)</sup> 山西 大<sup>1)</sup> 前田 和幸<sup>1)</sup>

## Development of ammonia mixed combustion engine for automobiles

Minoru Tsuda, Masateru Ishida, Tsuyoshi Ihara, Yamanishi Dai, Kazuyuki Maeda

In order to develop a retrofit compatible ammonia mixed combustion engine for automobiles, we utilized the property of ammonia to dissolve easily in water and used a "water mixed fuel generation device" developed by the National Fisheries University to produce ammonia water mixed fuel. An experiment was carried out in which ammonia was injected as a liquid at normal temperature under atmospheric pressure. To clarify the combustion characteristics and DPF performance when ammonia is used in a small high-speed engine, 214kW/3101min<sup>-1</sup> diesel engine with a DPF was operated using a fuel made from a mixture of gas oil and ammonia water, and the engine performance and characteristics of NOx, PM, and DPF were analyzed. As a result, it was clarified that ammonia can also be used in small high-speed engines.

**KEY WORDS:** heat engine, compression ignition engine, fuel economy, alternative fuel, ammonia mixed combustion (A1)

### 1. ま え が き

炭素成分 (C) を多量に含む化石燃料の燃焼が地球温暖化を促進しているとの観点から、炭素成分を含まない燃料として水素とアンモニアが注目されている。水素は貯蔵や輸送面で解決すべき課題が多いが、アンモニアは主に肥料の原料として、既に生産・運搬・貯蔵に関する技術が確立されており、世界的に流通しているため、アンモニアをディーゼルエンジン、ボイラーなどの燃料として活用する研究が実施されている。しかし、アンモニアは毒性を持つとともに、現在のディーゼルエンジンやボイラーなどの主燃料である化石燃料に比べ、着火性が悪い、燃焼速度が遅い、燃焼時に地球温暖化係数 265 の亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) や燃料油起源の窒素酸化物 (Fuel NOx) を生成する可能性が高いなどの燃焼に関する解決すべき課題を持つだけでなく、単位質量 (容積) 当たりの発熱量が小さい (石油系燃料の約 2.5 分の 1) という物理的な特性を持っている。表 1 に、アンモニアの物理的特性とこれをディーゼルエンジンの燃料として用いた場合の留意事項を示す。

アンモニアを自動車用エンジンの燃料として用いる場合、ガス化させることにより着火性が悪く燃焼速度が遅いという課題を克服することができるが、アンモニアは気化熱が非常に大きいので、大容量の熱交換器を必要とする。また、その貯蔵に際しては、高圧液化 (約 20 気圧) 又は低温液化 (大気圧下においてマイナス 33.4℃以下) という厳しい課題を克服する必要がある。

そこで本研究では、アンモニアが水に溶解しやすいという特性を利用して、水産大学校が開発・保有している“水混合燃料生成装置”活用することにより、まず、アンモニアを既存の

Table 1 Properties of ammonia

|                                       | Properties of ammon                | Things to keep in mind                                                  |
|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Calorific value                       | Approximately 40% of diesel oil    | Requires approximately 2.5 times as much fuel (storage) tank            |
| Auto-ignition temperature             | Approximately 630℃                 | Difficult to ignite                                                     |
| Combustion products                   | N <sub>2</sub> O (GHG)<br>Fuel NOx | Maintaining complete combustion                                         |
| Boiling point at atmospheric pressure | -(minus)33.4℃                      | Cooling or pressurization is required during transportation and storage |
| Others                                | Toxic and corrosive                | Ensuring safety                                                         |

自動車用エンジンの燃料として用いることが可能かどうかを確認するための実験を行った。実験では、水産大学校の内燃機関実験室に設置されている 214kW/3101min<sup>-1</sup> のエンジンを比較的高負荷 (160kW/2817min<sup>-1</sup>) で運転した時のエンジン性能 (エンジン各部の温度、圧力及び軽油の消費量) と排ガス特性 (NOx, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 及び PM) を計測した。なお、PM についてはソックスレー抽出法による成分分析を実施した。次に、比較的低負荷域 (54kW/1954min<sup>-1</sup>) で運転した時のエンジン性能と排ガス特性を明らかにするとともに、排気管系統に市販の大型トラック用 DPF (L:440 mm, D:260 mm, Capacity: 23,349cm<sup>3</sup>) を設置して、燃料として軽油、アンモニア水混合燃料、触媒系添加剤混合燃料で運転した時の DPF 入口温度・圧力、軽油の消費量及び排ガス特性を計測した。さらに、これらの実験結果を解析することにより、自動車用エンジンの燃料にアンモニアを混合した時のエンジン性能の変化を明らかにするとともに、自動車用ゼロエミッション対応技術としてアンモニアを用いる場合の課題と展望を示した。

1) 水産大学校 (759-6595 山口県下関市永田本町 2-7-1)

## 2. 実験装置と方法

### 2.1. 実験装置

図1に、水産大学校の内燃機関実験室に設置されたPMの計測・低減システムの概要と排ガスの流れを示し、図2に、エンジンの排気管系統に設置したDOCとDPFから構成されるPM低減装置における温度センサー、圧力センサー、排ガス( $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ )濃度測定用プローブの設置位置を示す。図1において、通常はバルブAを開きバルブBを閉じた状態でエンジンを運転することにより、全ての排ガスはPM低減装置が設置されていない排気管を流れる。この状態でサンプリングプローブCから吸引した排ガスを分析することにより、通常運転時における排ガス中の $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ 及びPMを計測できる。次に、バルブBが開かれた状態にしてバルブAを閉じると、全ての排ガスがPM低減装置を通過する。

図2において、エンジンから出た排ガスはDOCとDPFから構成されるPM低減装置を経て外気に放出されるが、DOC入口には温度センサーと圧力センサー及び排ガス濃度測定用プローブが設置されており、DPF入口には温度センサーと圧力センサーが設置されている。また、DPF出口には温度センサーと排ガス濃度測定用プローブが設置されている。

表2に、実験に用いた高速ディーゼルエンジンの主要目を示し、表3に実験に使用したセリウム系触媒を含むセリウム系添加剤の性状を示す。

PMの採取及び計測(分析)は、“JIS B 8001-1 往復動内燃機関一排気排出物測定—第1部：ガス状排出物及び粒子状排出物の台上測定”に基づいて実施し、PMの捕集にはこの規定の文献<sup>1)2)</sup>に示された装置を用いて行った。図3に、本実験に用いた高精度PM計測システムの概要を示す。図において、排ガスは水平方向から希釈トンネルに入り、曲がり部を経ることなく希釈空気により希釈される。また、希釈トンネル内の排ガス導入管は保温のため、二重管構造となっている。このような構造とすることにより、PM中に含まれるSOF(沸点約 $200^\circ\text{C}$ 以上)が排ガス導入管において希釈空気(温度約 $25^\circ\text{C}$ )により冷却されて凝縮して内壁に付着し、それに煤が付着することによる計測精度の低下を防止することが可能となる。

図4に、本実験に用いた“水混合燃料生成装置<sup>3)</sup>”の概要を示す。通常、燃料は燃料タンクから直接エンジンに供給される。これとは別に、水タンク(1)、燃料タンク(2)、水混合用燃料流量計(3)、水混合燃料に使用する水用流量計(4)、水用流量調整弁(5)、水混合燃料における水の混合割合を任意に設定可能なコントロールユニット(6)、循環ポンプ(7)、ミキサー(8)から成る“水混合燃料生成装置”を燃料の供給ラインに接続することにより、任意の水混合割合に設定された水混合燃料がエンジンに供給できる。

この“水混合燃料生成装置”の主要部であるミキサー(8)は、駆動部を持たない静止型流体混合器で、ハニカム構造のエレ

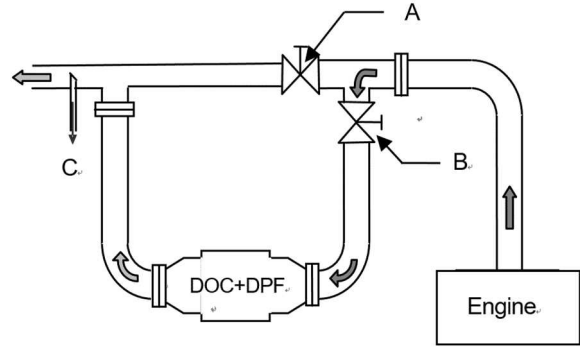


Fig. 1 Outline of experimental apparatus

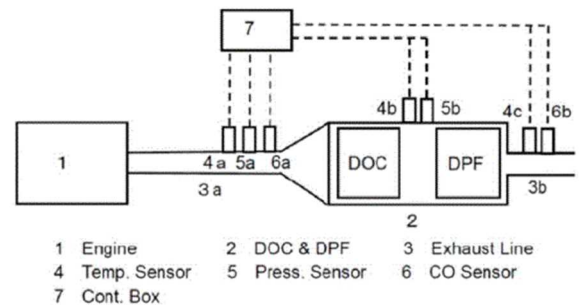


Fig. 2 Setting position of sensors

Table 2 Main specifications of engine

|                |                   |      |
|----------------|-------------------|------|
| Number of Cyl. |                   | 6    |
| Cylinder Bore  | mm                | 100  |
| Piston Stroke  | mm                | 110  |
| Max. Power     | kW                | 214  |
| Engine Speed   | $\text{min}^{-1}$ | 3101 |
| Max. Pme       | MPa               | 1.59 |

Table 3 Properties of catalyst

|                                             |                        |       |
|---------------------------------------------|------------------------|-------|
| $\text{CeO}_2$ Concentration to Fuel        | wt. ppm                | 25    |
| $\text{CeO}_2$ Concentration to Additives   | wt. %                  | 7.37  |
| Density of additives ( $15^\circ\text{C}$ ) | $\text{g}/\text{cm}^3$ | 0.917 |

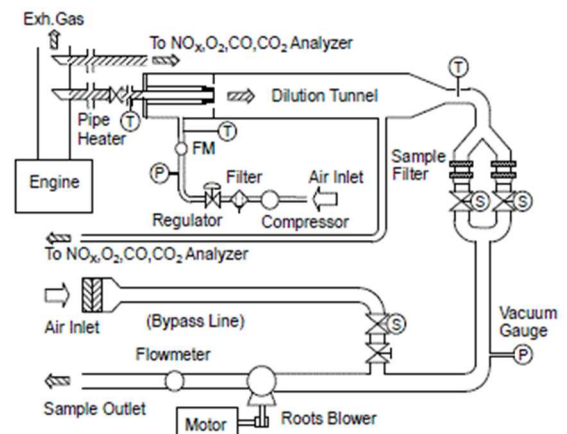


Fig. 3 Outline of PM measurement system

メントを直列に連結したユニット内部に複数の流体を加圧通過させ、せん断力を作用させることにより、超微粒化かつ均一化混合を短時間で行うことができる装置である。図に示すように、燃料タンク(2)から供給される燃料と水タンク(1)から供給される水を合流させた後に、エンジンの燃料噴射装置に近い位置で循環ポンプ(7)とミキサー(8)から構成される循環ラインにおいて水を連続的に微粒化させながらその一部をエンジンに供給して、燃料と水が分離する前に噴射することにより、添加剤を必要としない。

## 2.2. 実験方法

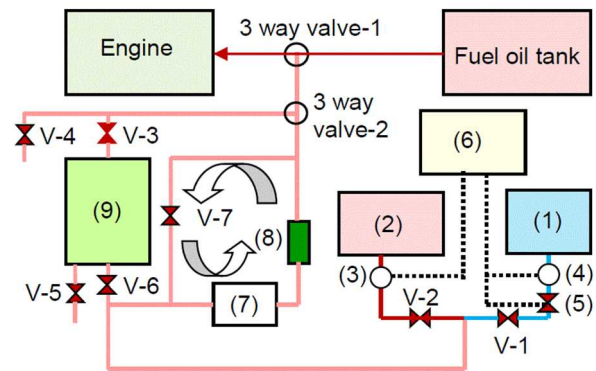
実験は、まずエンジンを比較的高負荷域( $160\text{kW}/2817\text{min}^{-1}$ )で軽油、水混合燃料、アンモニア水混合燃料で運転した時のエンジン性能と排ガスを計測した。なお、水混合燃料及びアンモニア水混合燃料は、図4に示す“水混合燃料生成装置”の水タンクに水及びアンモニア水を入れて生成した。次に、図1に示す実験装置を用いて、軽油、水混合燃料、アンモニア水混合燃料及びセリウム系添加剤混合燃料を用いてエンジンを比較的低負荷域( $54\text{kW}/1954\text{min}^{-1}$ )で運転し、その後、図1に示すDPFを設置したラインに切換えた時のエンジン性能と排ガス特性及びDPFの状態を明らかにした。

## 3. 実験結果

### 3.1. 比較的高負荷域におけるアンモニアの燃焼特性

図5に、エンジンを比較的高負荷で運転した時の、水の混合割合と軽油の消費量の変化を示し、図6に水の混合割合と $\text{NO}_x$ の変化を示す。これらの図において、緑○は軽油のみによる運転と、軽油に水を混合して運転した場合、黄○は燃料に対するアンモニアの混合割合約6%、青○は燃料に対するアンモニアの混合割合約11%、赤○は燃料に対するアンモニアの混合割合約14%に設定して運転した場合の軽油の消費量と $\text{NO}_x$ の変化を示している。これらの図において、燃料に水を混合した場合、軽油の消費量はほとんど変化しないが $\text{NO}_x$ は水の混合割合に比例して減少している。これに対し、燃料にアンモニア水を混合した場合、軽油の消費量は燃料に対するアンモニアの混合割合が増加するほど減少している。これは、アンモニアが有効に燃焼したことを示すものである。また、 $\text{NO}_x$ は燃料に対するアンモニアの混合割合が約6%の時は水を混合した場合と同じ傾向を示すが、アンモニアの混合割合が約11%を超えると減少割合が小さくなり、アンモニアの混合割合16%においては増加傾向となっている。これは、アンモニアの燃焼によって生成されたFuel  $\text{NO}_x$ が、水の混合によって減少する $\text{NO}_x$ の量を超えたためである。

図7に、軽油及びアンモニア水の混合割合20%の燃料を用いて、エンジンを比較的高負荷で運転した状態において、図3に示す高精度PM計測システムを用いて採取したPMの写真と、その成分をソックスレー分析により明らかにした結果を示す。図に示すように、燃料にアンモニア水を混合することに



Legend: (1)water tank, (2)fuel oil tank, (3)flow meter for fuel oil, (4)flow meter for water, (5)flow regulating valve, (6)control panel, (7)circulating pump, (8) fluid mixer, and (9)separation tank

Fig. 4 Diagram of the water mixed fuel generator

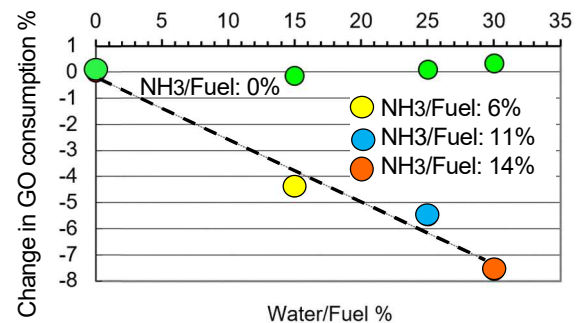


Fig.5 Relationship between water mixing ratio and FOC

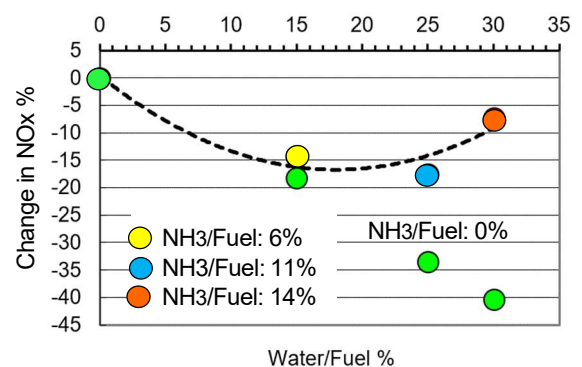


Fig.6 Relationship between water mixing ratio and  $\text{NO}_x$

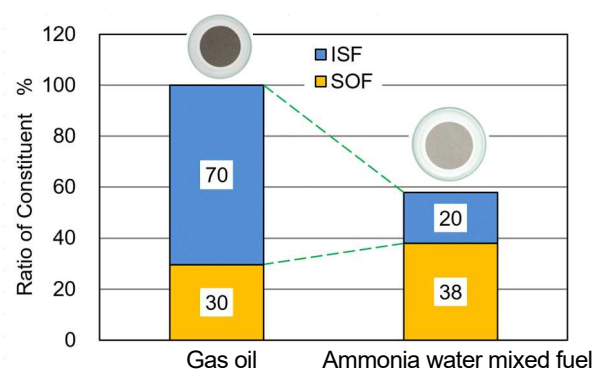


Fig. 7 PM components of ammonia water mixed fuel

より PM 中に含まれる Soot が大幅に低減するが, SOF の割合は増加している。

### 3.2. 比較的低負荷域におけるアンモニアの燃焼特性

図 8 に, 図 1 に示す排気管に DPF を設置した実験装置を用いて, 軽油と, 燃料に対するアンモニアの混合割合 6% のアンモニア水混合燃料により, エンジンと比較的低負荷域 ( $54\text{kW}/1954\text{min}^{-1}$ ) で運転した時の DPF 入口温度と DPF 入口圧力の関係を示す。軽油を用いて運転した場合, DPF 入口温度が  $310^{\circ}\text{C}$  になるまで DPF 入口圧力はほぼ一定の割合で上昇を続け,  $310^{\circ}\text{C}$  以上においては上昇しなくなっている。これは, 図 2 に示す DOC 及び DPF に担持された触媒により, エンジンで生成された煤が連続して酸化除去されたためと考えられる。これに対し, アンモニア水混合燃料を用いて運転した場合, 図 1 に示す DPF を設置したラインに切換え直後における DPF 入口圧力はほぼ等しいが, DPF 入口温度が約  $290^{\circ}\text{C}$  付近から圧力の上昇割合が低下し, 約  $300^{\circ}\text{C}$  付近から上昇しなくなっている。

図 9 に, 図 8 に示す運転状態における DPF 入口圧力と軽油の消費量の関係を示す。いずれの燃料を用いて運転した場合でも, DPF 入口圧力の上昇とともに軽油の消費量は増加傾向となるが, 全ての運転状態においてアンモニア水を用いて運転することにより, 軽油の消費量が約 3% 低くなっており, 図 5 に示す軽油の消費量の減少割合に近い値となっている。

図 10 に, 軽油及びアンモニア水の混合割合 20% の燃料を用いて, エンジンと比較的高負荷で運転した状態において, 図 3 に示す高精度 PM 計測システムを用いて採取した PM の写真と, その成分をソックスレー分析により明らかにした結果を示す。図に示すように, 燃料にアンモニア水を混合することにより PM 中に含まれる Soot が大幅に低減するが, SOF の割合は増加している。

## 4. 実験結果の解析と今後の展望

### 4.1. 水混合燃料及びアンモニア水混合燃料の噴霧燃焼特性

図 11 に, ディーゼルエンジンにおける軽油と水混合燃料の噴霧燃焼モデルを示す。左図において, 燃焼噴射弁から噴射された燃料は, 着火遅れ期間中に微粒化過程, 蒸発過程において周囲の空気を導入して予混合気を形成する。この時の燃焼室温度は  $500^{\circ}\text{C}$  以上で軽油の着火温度を超えているため, 着火

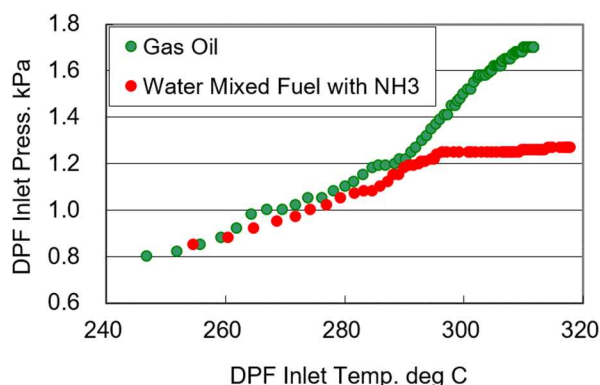


Fig. 8 Relationship between DPF inlet temperature and DPF inlet pressure

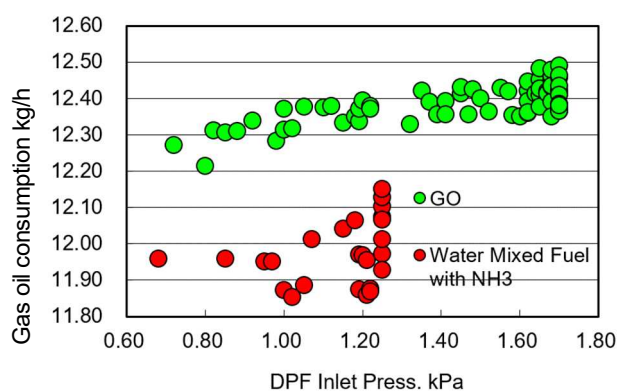


Fig. 9 Relationship between DPF inlet temperature and fuel oil consumption

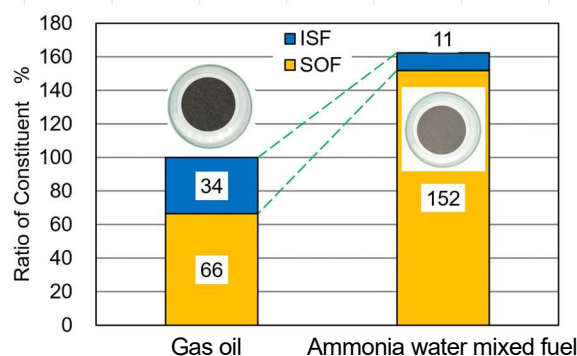


Fig. 10 PM components of ammonia water mixed fuel

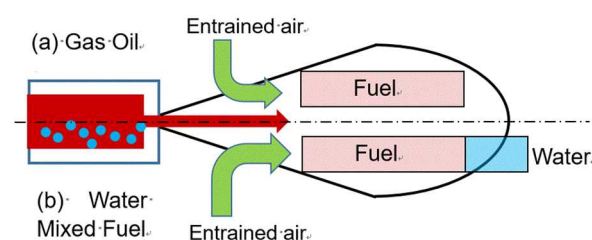
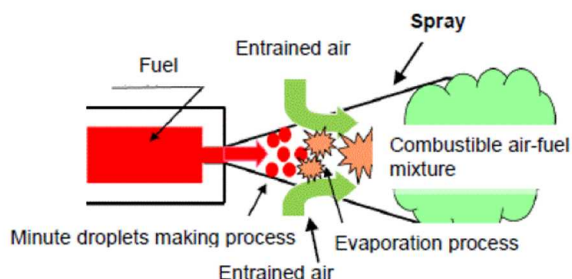


Fig. 11 Diagram of the fuel atomization process

遅れ期間中に噴射された燃料は爆発的に燃焼する（予混合燃焼）。これに対し、アンモニアの着火温度は、表 1 に示すように、630℃と導入空気温度（予混合気の温度）よりも高いため、自らは着火しないが、軽油燃焼の急激な温度上昇により着火・燃焼が始まる。このように、アンモニアを自動車用エンジンの燃料として用いた場合、アンモニアのみでは着火に至るのは困難であるが、軽油などの助燃剤的な役割を持つ物質を活用することにより燃焼は可能である。

図 11 の右図に、燃料に水を混合した場合の噴霧燃焼モデルを示す。燃料の噴射量を一定とした場合、水の混合割合に比例して流体の総噴射量が増加するため噴霧への導入空気量が増加する。これにより、予混合気内における燃料に対する空気量が増加して燃焼が改善されるとともに、水の気化熱による予混合気の温度が低下するとともに、蒸発した水蒸気による燃焼ガスの比熱の増加により温度上昇が抑制されるため、酸素（空気）不足による PM の生成と、Thermal NOx の生成が抑制され、図 5、図 6、図 7 に示すように、同一出力における軽油の消費量、NOx 及び PM の同時低減が可能となる。

#### 4.2. セリウム系触媒の PM 低減効果<sup>4)~9)</sup>

図 8 において、排ガスの DPF 入口温度が、軽油の場合は約 310℃、アンモニア水混合燃料の場合は約 300℃以上では DPF 入口温度が上昇しなくなることを示した。これは、図 2 に示す DOC と DPF に担持された触媒が活性化温度以上において機能を発揮（煤を酸化除去）するためであり、DPF 入口圧力のバランスポイント（圧力が上昇しなくなる時の温度）が異なるのは、生成される煤の量が異なるためである。

図 12 に、DOC と DPF に担持された触媒により煤が酸化除去されるモデル（メカニズム）を示す。図において、排ガス中には PM とともに O<sub>2</sub>（酸素）及び NO（一酸化窒素）が流動しているため、触媒の作用により酸化力が強い酸化成分（図中では NO<sub>2</sub>）を発生させ、この酸化成分が PM（C）表面に到達することにより煤の酸化を促進する。しかし、このモデルでは DOC（DPF）に担持された触媒を通過する際にのみ NO<sub>2</sub> が生成され、DPF に堆積した PM（C）の酸化を促進して NO と CO<sub>2</sub> を生成した後、排ガスとともに DPF の外に排出される。

図 13 に、新たに開発されたセリウム系触媒を燃料に添加した時の、煤の酸化除去モデルを示す。燃料とともに噴射された触媒（酸化セリウム）は、まず、燃焼室において酸素を吸蔵し、次に燃焼ガスとともに流動する NO と反応して NO<sub>2</sub> を生成する。この NO<sub>2</sub> が燃料の燃焼において生成された煤を酸化除去して NO と CO<sub>2</sub> を生成するという動作を繰り返し行うことにより、燃焼室内における煤の生成が抑制される。この状態は、排ガスが乱流状態となる過給機や、DPF の狭い流路を流動する際にも発生するため、煤は、燃焼室、排ガスの流路及び DPF 内部において繰り返し酸化除去されることにより、DPF への堆積量が減少し、DPF 入口圧力の上昇が抑制される。

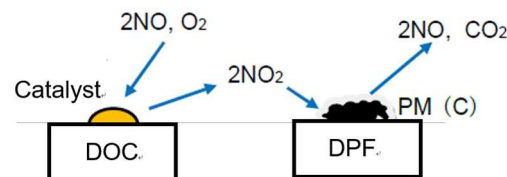


Fig. 12 Soot oxidation removal model using Catalytic action

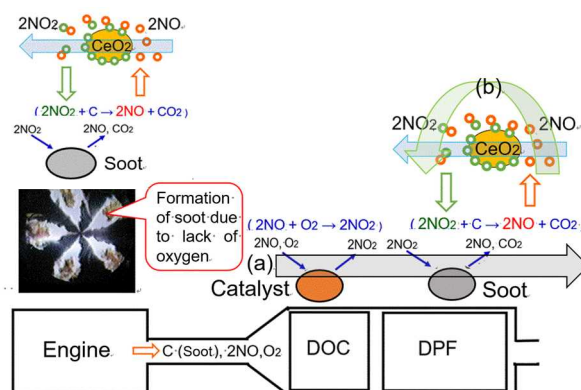


Fig.13 Continuous oxidation removal model of soot in combustion chamber, exhaust gas system, and DPF

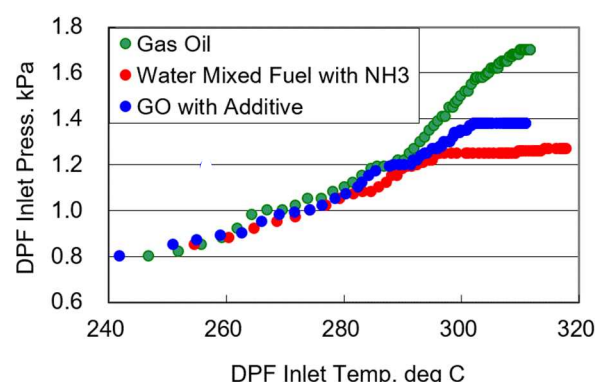


Fig. 14 Relationship between DPF inlet temperature and DPF inlet pressure

図 14 に、図 1 に示す排気管に DPF を設置した実験装置を用いて、軽油、燃料に対するアンモニアの混合割合 6%のアンモニア水混合燃料及び、燃料にセリウム系添加剤を混合してエンジンを比較的低負荷域（54kW/1954min<sup>-1</sup>）で運転した時の DPF 入口温度と DPF 入口圧力の関係を示す。図 10 に示すように、アンモニア水混合燃料を用いることにより PM 中に含まれる Soot を大幅に低減することができるため、DPF 入口圧力の上昇は抑制されるが SOF の割合が増加する。このことから、比較的低負荷時におけるアンモニア水混合燃料の使用は困難であると考えられる。これに対し、燃料にセリウム系添加剤を混合することにより燃焼室、排気系統及び DPF において煤を繰り返し酸化除去することにより、アンモニア水混合燃料と同程度の煤の低減効果があることが分かる。

#### 4.3. 自動車用アンモニア混焼エンジンの課題と展望

自動車用エンジンにおいてアンモニア水を混焼させる場合、図 5、図 6、図 7 に示すように、比較的高負荷域においては混焼するアンモニアの量に比例して軽油の消費量が減少するとともに、NO<sub>x</sub> と PM (Soot) が低減するという結果を得た。これらの結果から、比較的高負荷域においては自動車用エンジンにおいてもアンモニアの混焼は可能であるものと考えられる。しかし、図 8、図 9、図 10 に示すように、比較的低負荷域においてはアンモニア水を混焼させることにより、軽油の消費量と PM 中の Soot は減少するが、PM 中の SOF が大幅に増加するという結果を得た。これは、比較的低負荷域においては燃焼期間が短く燃焼室温度も低いため、着火性が悪く燃焼速度が遅いというアンモニアの特徴が影響したものと考えられる。このような場合は、図 13 及び図 14 に示すように、燃料に添加剤を混合することにより、燃焼室、排気系統、DPF において煤の生成を抑制して DPF に堆積する煤の量を低減することにより燃費の悪化を防止できる。

図 15 に、これらの実験結果を基に提案する“自動車用アンモニア混焼エンジンシステム”を示す。図において、比較的高負荷域において走行する場合は、駆動装置とエンジンを直結することにより、エンジンの出力を最も有効に活用することが可能となる。また、比較的低負荷域において走行する場合は、エンジンを比較的高負荷状態で運転して蓄電池に充電しながら走行、又は蓄電池に充電された電力を用いてモーターによる走行を行うことが可能である。

#### 5. ま と め

レトロフィット対応自動車用アンモニア混焼エンジンを開発するために、アンモニアが水に溶解しやすいという特性を活用して、214kW/3101min<sup>-1</sup>のエンジンと水産大学校が開発した“水混合燃料生成装置”を用いて、燃料に水とアンモニアを混合することによりアンモニアを常温常圧の状態では液体噴射する実験を行った。その結果、次の結論を得た。

(1) 燃料にアンモニア水を混合した場合、軽油の消費量は燃料に対するアンモニアの混合割合が増加するほど減少する。これは、2817min<sup>-1</sup>という高速回転時においてもアンモニアが効果的に燃焼していることを示すものである。

(2) NO<sub>x</sub> は燃料に対するアンモニアの混合割合が約 6%の時は水を混合した場合と同じ傾向を示すが、アンモニアの混合割合が約 11%を超えると減少割合が小さくなり、アンモニアの混合割合 16%においては増加傾向となる。これは、アンモニアの燃焼によって生成された Fuel NO<sub>x</sub> が、水の混合によって減少する NO<sub>x</sub> の量よりも増大するためである。

(3) 燃料にアンモニア水を混合することにより PM 中に含まれる Soot が大幅に低減するが、SOF の割合は増加する。

(4) アンモニア水混合燃料を用いることにより、軽油の消費量、NO<sub>x</sub>、PM を同時に低減することができる。

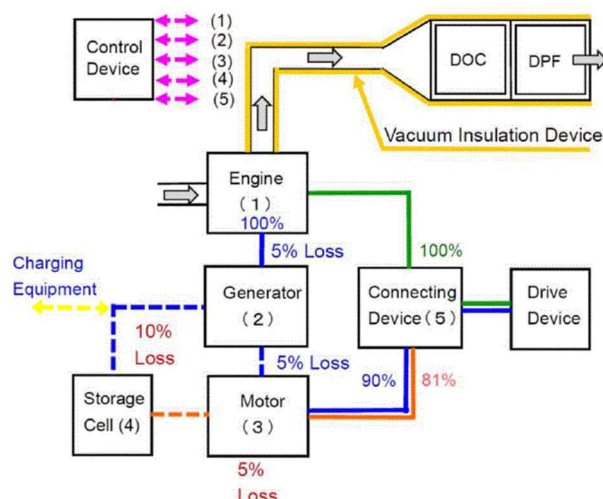


Fig.15 Automotive ammonia mixed combustion engine system

#### 参 考 文 献

- (1) 前田和幸, 高崎講二, 津田 稔, 阿部清三: 希釈率が PM 計測値に及ぼす影響, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 38(8), 509-513(2003)
- (2) Kazuyuki MAEDA, Koji TAKASAKI, Kazuhiko MASUDA, Minoru TSUDA, Mikio YASUNARI: Measurement of PM Emission from Marine Diesel Engines, 24th CIMAC International Congress on Combustion Engines, Paper No.107, 1-7(2004)
- (3) 前田和幸, 最上賢一: 水混合燃料生成装置, 特許第 5941224 号(2016)
- (4) 津田稔, 前田和幸, 山西大, 成田克矢, 神部典之, 表清隆: セリウム(セリア)が PM の酸化除去に及ぼす影響, 自動車技術会 2020 秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20206240, p.1-6 (2020)
- (5) 津田稔, 山西大, 石田雅照, 前田 和幸: 低負荷域におけるリアルタイム再生 DPF システムの開発, 自動車技術会 2021 春季大会学術講演会講演予稿集, No.20215154, p.1-5 (2021)
- (6) 津田稔, 山西大, 石田雅照, 大原順一, 前田和幸: 給気加熱を用いた低負荷域における DPF の連続再生システムの開発, 自動車技術会 2021 秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20216018, p.1-6 (2021)
- (7) 津田稔, 大原順一, 山西大, 石田雅照, 前田和幸: 真空断熱装置の設置による DPF の性能改善効果, 自動車技術会 2022 春季大会学術講演会講演予稿集, No.20225075, p.1-5 (2022)
- (8) 津田稔, 大原順一, 山西大, 石田雅照, 前田和幸: 熱伝導率特性に優れた DPF 用真空断熱装置の開発, 自動車技術会 2022 年秋季大会学術講演会講演予稿集, No.20226012, p.1-6(2022)
- (9) 津田稔, 石田雅照, 山西大, 大原順一, 前田和幸: 給気加熱と真空断熱 DPF を備えるハイブリッドシステムの開発, 自動車技術会 2023 年春季大会学術講演会講演予稿集, No.20235005, p.1-6(2023)