

PS-12 船用実機スケールの燃焼過程を模擬する 大型燃焼試験装置の開発と展望

環境・動力系 * 川内 智詞、仁木 洋一、市川 泰久、高崎 講二

1. はじめに

地球温暖化対策への関心が高まる中で、2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、世界各国で取り組みが加速している。海上輸送についても脱炭素化が急務となっており、グリーンイノベーション(GI)基金などのプロジェクトの中で、水素やアンモニアを燃料とするエンジンの開発が進められている。

水素やアンモニアなどの次世代燃料に関するエンジン研究は、重油や軽油などの石油系液体燃料と比べて少ない。そのため、エンジン内の燃焼過程や排気生成について不明な点が多く、エンジンパラメータを適正化するための基礎的知見が欠如している。一般的に性能に影響するパラメータの感度解析は、エンジン試験によって実施される。しかしながら、エンジンサイズが大きくなれば燃料や実験部品製作のコストは上がり、単気筒試験機を用いた場合でも広範囲に且つ細かい刻み幅でパラメータを変更することが困難となる。

単気筒試験機に代わるパラメータ解析が可能な装置として、急速圧縮装置や定容燃焼器などの要素試験装置がある。これらを用いた試験は単発の燃料噴射によって実施されるため、少量の燃料で且つ短時間に燃焼状態を評価できる。ここで、要素試験装置で設定する条件を実機に近づけられれば、実機と要素試験の乖離がなくなり実機開発に還元しやすいデータが取得できる。こうした理由から、当所では船用2ストロークエンジンを対象とする実機スケールの燃焼過程を模擬できる世界最大級の試験装置の開発を進めている。本報では、装置の概要ならびにその研究展望について紹介する。

2. 試験装置の構成

装置の外観図を図-1に示す。容器本体は外径が640mm、容器内径を350mm、容器高さを150mmとする、パンケーキ型の燃焼室形状である。燃焼室内径は、2ストロークエンジンの燃焼室直径を模擬し、燃焼室高さは燃料噴霧が容器蓋と干渉しない十分な高さを確保した。容器側面と蓋にはカートリッジヒーターが挿入され、容器が実機のシリンダ壁に相当する温度に保たれる。

本装置の構成を図-2に示す。まず、給気加熱タンクに作動ガスを充填し、タンク内部に組み込まれたヒーターによって、作動ガスをエンジンの圧縮上死点近傍に相当する温度まで昇温する。作動ガスが目的とする条件に達したところで、給気弁を開く。これにより、作動ガスは給気加熱タンクから燃

焼室容器内に移動する。高温の作動ガスは、給気加熱タンク内と燃焼室内の圧力差によって運動量をもって流れ込むため、燃焼室内には旋回流(スワール)が形成される。作動ガスの充填を終えたあと、給気弁を閉じ、旋回流の形成された燃焼室内に燃料を噴射し、実機の燃焼過程を再現する。

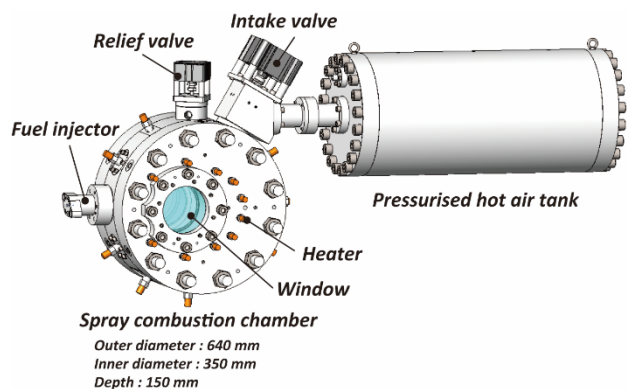


図-1 大型燃焼試験装置外観図

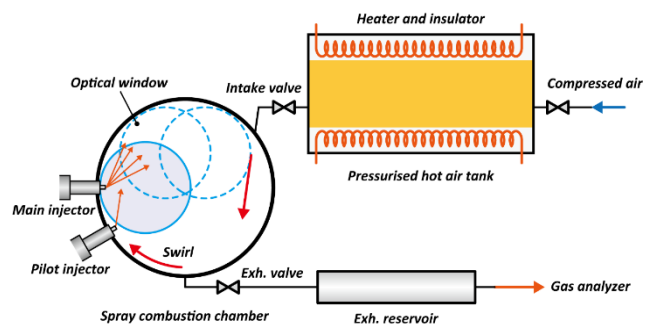


図-2 試験装置構成

燃料は、2ストロークエンジンのサイド噴射方式を模擬して、容器側面から噴射される。補助燃料用の噴射弁と主燃料用の噴射弁が取り付けられるようになっており、補助燃料の火種によって主燃料噴霧の燃焼が開始するデュアルフェュエルエンジンの燃焼が模擬できる。本装置は主にディーゼルサイクル型を対象としたものであるが、後述するようにオートサイクル型の実現性を検討するためにも活用される。

着火遅れや後燃え期間といった燃焼の良否を評価するため、燃焼室内の圧力が容器蓋部に搭載した圧電式の圧力セン

サによって計測される。また、容器蓋に取り付けた可視化域 180 mm の燃焼観察窓を通して燃焼室内が観察される。シャドウグラフなどの透過光を利用した光学計測を実施するため、窓は両面に取り付けられる。容器蓋の設置位置を変更することによって可視化窓が円周方向に移動するため、燃焼室内全域の観察が可能となる。試験終了後、排気弁を開いて燃焼室内ガスを排気タンクに移動させ、排気成分が分析される。

エンジン燃焼研究用の可視化装置は数あるものの、2 ストロークエンジンの特徴である大型の燃焼室空間、サイド噴射方式、旋回流を模擬した燃焼試験装置は少ない。著者らの知る限り、欧州の HERCULES プロジェクト¹⁾の中で Wärtsilä 社とスイス連邦工科大学が共同開発した装置²⁾以外にない。Wärtsilä 社らが開発した装置と当所で開発している装置は、給気弁の取り扱いから熱力学的な系が異なり、前者が開いた系であるのに対し、後者が閉じた系となる。閉じた系の場合、蒸発や燃焼などの系内の物理的、化学的变化が容器内の圧力変化として表れる。そのため、圧力変化量をもとにして吸熱量や発熱量を換算する熱発生解析が可能となり、着火や燃焼の状態を詳細に評価できるなどのメリットがある。

3. 将来展望

上述してきたように、当所が開発を進める試験装置では、実機試験と同様の燃焼解析や排気分析ができることに加えて、実機試験では困難となる可視化計測が行える。また、実機に比べて少量の燃料で試験ができるなど、時間とコストの点でも優れる。さらに、運転が成立するか否かで実施できる試験条件が制約される実機と異なり、広範囲の実験条件で試験が行える。これらの利点を活かして実施の想定される研究内容を下記に列挙する。

1. 燃焼シミュレーションのための検証データの取得

実験部品の試作数や試験点数を減らすため、エンジン開発の中で数値流体力学 (CFD) にもとづく燃焼シミュレーションが活用されている。燃焼シミュレーションは技術的に確立されつつあるものの、初期条件、境界条件だけで現象を予測できるものとなっていない。噴霧の到達距離や噴霧角などの噴霧特性が再現できるように、使用するモデルの選定やモデル定数の調整など精度検証が必要となる。このとき精度検証で対象とする条件を実機に近づけられれば、解析時に適切なモデル定数を設定でき、シミュレーションの精度を高められる。こうした理由から、実機の再現性が高い本装置の特徴を活かして、燃焼シミュレーションの精度検証用データを取得する。

2. エンジンパラメータ適正化のための研究

エンジン性能を高めるため、噴孔配置やスワール強度などの性能に影響するパラメータの適正化が図られる。条件設定が容易である本装置の特徴を活かして、パラメータを広範囲に変更した試験を実施し、パラメータを適正化するための知見を得る。例えば、スワール比と水素噴流の軌跡の変化を調査し、燃焼室壁面に火炎が近接し過ぎない理想とする燃焼を

実現するための噴射条件とスワール比の組み合わせを明らかにする。

3. 補助燃料評価のための研究

次世代燃料を利用するエンジンは、燃焼方法にデュアルフェュエル型が採用され開発が進められており、燃焼の開始や燃焼を支援する役割で補助燃料が必要となる。少量の燃料でも試験ができ、燃料交換が容易となる本装置の特徴を活かして、補助燃料の性状をパラメータとする燃焼試験を実施する。補助燃料の物理的性質や化学的な性質が主燃料の燃焼に及ぼす影響について調査し、点火や燃焼支援の観点から補助燃料側に要求される仕様を明らかにする。

4. 新燃焼コンセプトの開発のための研究

水素を燃料とする 2 ストロークエンジンは、ディーゼルサイクル型で開発が進められている。ディーゼルサイクル型では、雰囲気圧力が高い上死点近傍で燃料が噴射されるため、高い噴射圧力が必要となる。それに対して、圧縮工程中に燃料を噴射して形成される予混合気を補助燃料で点火するオットーサイクル型の燃焼方式が実現できれば、ボイルオフガスが利用できたり、噴射系を簡素化ができたりするなど利点が多い。広範囲に条件設定ができる本装置の特徴を活かして、圧縮工程中の雰囲気条件を再現し、ディーゼルサイクル型よりも低い噴射圧力を設定して試験を実施する。噴射圧力が混合気形成過程に及ぼす影響を調査し、オットーサイクル型の水素エンジンの実現可能性について検証する。

4. まとめ

本報では、当所で開発を進めている船用実機スケールの燃焼過程が模擬できる世界最大級の試験装置について紹介した。本試験装置は、実機試験と比較して詳細な燃焼状態の把握ができるだけでなく、低コストで且つ短時間に試験が実施できる特徴を有している。本報で述べた研究を実施していくためにも、当所で実施する重点研究の中で解析技術の高度化を図り、装置性能を高めていく計画である。カーボンニュートラル社会の早期実現が求められる中、海運業界においても GHG 削減技術の確立は急務となっており、本装置が活用できる部分は大きいと考えている。

参考文献

- 1) Nikolaos Kyrtatos, et al. : Ten Years After: Results from the Major Programme HERCULES A-B-C on Marine Engine R&D, CIMAC Congress 2013, Paper No.18
- 2) Kai Hermann, et al. : Development of a reference experiment for large diesel engine combustion system optimization, CIMAC Congress 2007, Paper No.98