

世界初となる大型船用エンジン用可変圧縮比機構

World's First Variable Compression Ratio for Large Marine 2 Stroke Engines

増田 裕	技術開発本部技術基盤センターレシプロエンジングループ
廣瀬 孝行	技術開発本部技術基盤センターレシプロエンジングループ 課長
山田 剛	技術開発本部技術基盤センター 技師長
瀧本 崇弘	株式会社 IHI 原動機 船用事業部相生事業ユニット相生技術部 グループ長
森山 功治	株式会社 IHI 原動機 船用事業部相生事業ユニット相生技術部 次長

大型船用エンジン用の可変圧縮比 (VCR: Variable Compression Ratio) 機構は、燃料消費率を削減し、そのうえ多様な燃料に対応可能なことから循環型社会に大幅に貢献できるキーデバイスである。2018年のマリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー(土光記念賞)を受賞したことから世の中に注目されている技術である。本稿では、VCR機構の概要、VCR機構の実証結果とともにエンジン性能に与える影響、また循環型社会に対していかに貢献できるかを述べる。

The Variable Compression Ratio (VCR) system for 2 stroke marine engines can reduce fuel consumption and adapt to various fuels. Therefore, this system is a very attractive device for achieving a sustainable society; and it also won the award for Marine Engineering of the Year 2018. This paper describes the overview of the VCR system, verification results of the VCR system and engine performance, and finally the impact of the VCR system on a sustainable society. The VCR system is currently under development and being targeted for early commercialization.

1. 緒 言

日本の輸出入貨物の99.7%(質量ベース)が船舶輸送に委ねられている⁽¹⁾ことから、船用主機関の主流である大型船用クロスヘッド型2ストロークエンジン(大型船用エンジン)は、現代のグローバル社会には欠かすことのできない産業機械といえる。大型船用エンジンは自動車用などの小型エンジンに比べて熱効率は断然良いものの、化石燃料の利用による温室効果ガスの排出などの環境負荷や枯渇性資源の利用などで、持続可能な社会を目指す循環型社会の実現に対し、さらなる改善が期待されている。そこで、大型船用エンジンが循環型社会で求められている3R(Reduce, Reuse, Recycle)に寄与するためには、Reduce(温室効果ガスおよび燃料消費量の低減)、Reuse(持続可能なエネルギーへの転換)、Recycle(排ガスの再循環や再利用)、エンジン部品の再生利用が考えられる。

船舶の排ガスは、国際海事機関(IMO)によって規制が強化されつつあり、たとえば2050年には船舶から排出されるGHG(Greenhouse Gas:温室効果ガス)総排出量を2008年比で50%削減を目指す戦略を掲げている。温室効果ガスの大半はCO₂であり、大型船用エンジンから排出されるCO₂の削減手法としては、再生可能エネルギー由

来のカーボンフリー燃料(NH₃, H₂など)、バイオマス燃料などのカーボンニュートラル燃料、LNG燃料などへの燃料転換や、燃料消費率の削減が挙げられる。カーボンニュートラルな燃料や再生可能エネルギー由来のカーボンフリー燃料は、持続可能なエネルギーとしても位置付けられるものの、現状の大型船用エンジンの燃料消費量では需要に対する供給量が追いつくのは難しいと考えられている。LNG燃料は従来の液体燃料を使用した場合に比べて温室効果ガス低減の効果は大きいものの、既存のディーゼルエンジン以上の熱効率を著しく超越すること(燃料消費率の低減)は困難である。

燃料消費率の削減手法の一つとして、幾何学的圧縮比(以下、圧縮比)を高めることによる熱効率の向上が考えられるが、最適な圧縮比はエンジンの運転条件や燃料組成などの運転環境によって異なり、不変的なパラメータではない。そこで、エンジンの運転中に運転環境に応じて自在に圧縮比を調整できる、世界初となる大型船用エンジン用の可変圧縮比(VCR)機構を株式会社IHI原動機(IPS)と共同で開発し、第1図に示すIPSの相生工場に設置されている国内最大級のテストエンジン(6X72DF)でその有効性を実証した。これにより、実際の運転条件における燃料消費率を大幅に削減するとともに、温室効果ガスも削



第 1 図 国内最大級のテストエンジン (6X72DF)
Fig. 1 2 stroke test engine in IPS (6X72DF)

減することができ、循環型社会の Reduce に貢献できることが分かった。また、VCR 機構によって圧縮比を変えて圧縮端の作動ガスの温度をコントロールすることで、多様な燃料の組成に応じて最適な着火時期を制御できることも分かった。本稿では、主に VCR 機構によって得られる効果について言及するため、構造、開発試験、詳細な性能などの報告は、参考文献(2)～(4)を参照いただきたい。

2. IHI・IPS 独自の VCR 機構

2.1 VCR 機構のコンセプト

本 VCR 機構は、第 2 図に示す圧縮比可変手法のコンセプトのように圧縮上死点の燃焼室容積 (V_c) を変えることで圧縮比を変更するものである。筆者らが開発したクロスヘッド型 2 ストロークエンジン用 VCR 機構を第 3 図

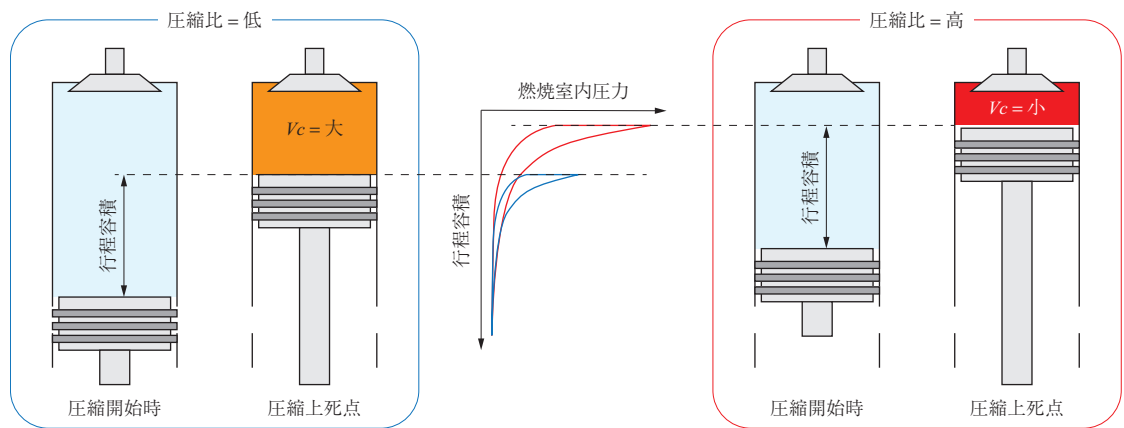
に示す。このようにクロスヘッドピンからのピストン棒の突出量を変えることによって燃焼室の容積を変えている。本圧縮比可変手法は、ピストン棒を有するクロスヘッド型エンジン特有であり、小型エンジン向けに開発されている VCR 機構^{(5)～(9)}とは異なる手法である。

ピストン棒とクロスヘッドピンの間にある下部油圧室に作動油を供給し、油圧ピストンを上下させることで、クロスヘッドピンからのピストン棒の突出量を可変としている。ピストン棒の突出量を増加させるための作動油は、クロスヘッドピンに固定されたプランジャポンプによって圧送される。作動油にはピストン冷却油を併用しており、本 VCR 機構のために新たな作動油供給システムを設ける必要はないため、油圧システムをシンプルかつ安価に構成することができる。一方でピストン棒の突出量を減少させる際は、同様にクロスヘッドピンに固定されたリリーフ弁から下部油圧室の作動油をエンジンのクランク室内に放出する。今回、試験用に製作した VCR 機構では、クロスヘッドピンからピストン棒を最大で 100 mm 突出できる設計とし、圧縮比 12.0 ～ 18.0 の間で無段階に変更できるようにした。

2.2 VCR 機構によるエンジン性能

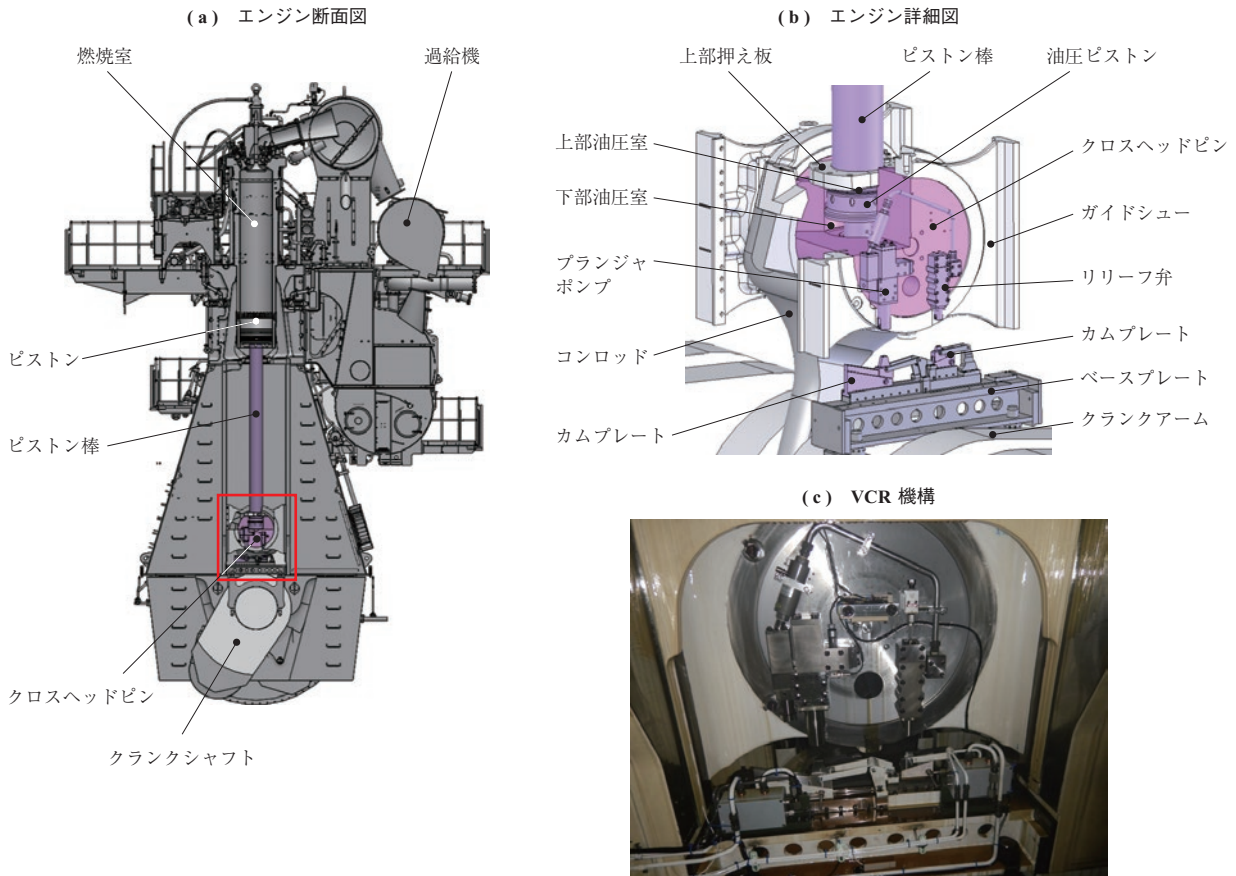
現行の大型船用エンジンの 1 気筒に本 VCR 機構を搭載し、VCR 機構の動作確認と動作性能およびエンジン性能に与える影響を評価した。その結果、VCR 機構は設計どおりに動作し、それに伴いエンジン性能は理論どおりに熱効率が改善することを確認した^{(2)～(4)}。また、そのときの熱効率の上昇割合は理論熱効率と比例関係であることも分かった。

第 4 図に VCR 機構による燃焼特性を示す。さらに、

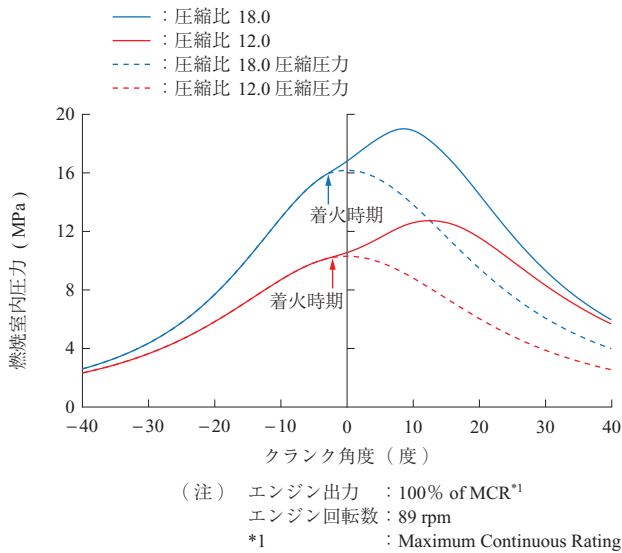


(注) V_c : 燃焼室容積

第 2 図 圧縮比可変手法のコンセプト
Fig. 2 Concept of Variable Compression Ratio



第 3 図 VCR 機構の概略
Fig. 3 Variable Compression Ratio system



第 4 図 VCR 機構による燃焼特性
Fig. 4 Cylinder pressure w/ and w/o VCR system

圧縮比を上昇させることで第 4 図に示すように自着火タイミングが早まることが確認された。これは圧縮比を高めることによって燃焼室内の作動ガスの圧縮端温度が上昇して燃料の着火性向上により、燃料の着火遅れが短くなっているためである。そのため、今後の SO_x 規制やシエール

ガスの利用拡大によってさまざまな燃焼特性を有する燃料が市場に流通しても、VCR 機構を搭載しているエンジンであれば、さまざまな燃料を安定して燃焼できる適切な圧縮端温度を得られることが確認できた。

3. VCR 機構が循環型社会に与える効果

3.1 燃料費削減および CO_2 排出量削減

前述のとおり、VCR によって圧縮比を増加させることで燃料消費率を大幅に低減できることが確認された。新造船では計画した巡航船速域（一般的にエンジン出力 75 ~ 85%）で、最適な燃料消費率となるように設計されている。ところが、実際には積荷の量、輸送期限、燃料の価格などさまざまな要因によって船速を自在に変更する必要があり、とりわけ燃料費削減のために減速運航を強いられている。船速とエンジンの出力は 3 乗の関係にあり、僅かな船速の増減によりエンジン出力は大幅に変化するが、従来、圧縮比が固定されているエンジンでは、それらのさまざまな出力で最適な運転を維持することは困難である。

一般的に圧縮比が固定されている場合は、出力の減少に伴い燃焼室内最大圧力 (P_{max}) は低下し、燃料消費率も悪

化する。そこで、第5図に示すようにVCR機構によって P_{max} の設計限界内で圧縮比を出力低下に従って高めることで、出力の減少とともに悪化した燃料消費率を従来と同等またはそれ以上に改善することができる。しかし、VCR機構の圧縮比の可変範囲によっては一定出力以下で圧縮比の可変範囲の上限に達して、燃料消費率の改善は限定的になる。

たとえば、大型コンテナ船で減速運航した際のエンジン出力を45% $L^{(10)}$ 、年間運行時間を7000時間とし、その際にVCRによって従来に比べて圧縮比を増加させたと仮定すると、最大で年間約7000万円（重油の価格を40000円/1klで計算）の燃料費を削減、燃料量約1500t（CO₂の排出量を約4500t（東京ドーム約2個分））削減することが期待できる。国土交通省の調査によると、世界中の海で運航されている大型コンテナ船（10000TEU以上）は約300隻である⁽¹¹⁾。これらすべての就航船にVCR機構をレトロフィットし、同一の運航条件で仮定すると年間で約45万t（210億円相当）の燃料量、CO₂換算で約135万t（約14万人分の年間CO₂排出量）が削減できる。これによって、環境にやさしい輸送が可能になるとともに、輸送費用を安価にできるため製品の価格を従来と比較して安価にできる。

3.2 再生可能エネルギー（カーボンフリー燃料、カーボンニュートラル燃料）との融合

再生可能エネルギー由来のカーボンフリー燃料や再生可能エネルギーであるカーボンニュートラル燃料（バイオマス）といった次世代の燃料は、従来の液体燃料（重油など）と比べて大幅に燃焼特性が異なり、燃料によって

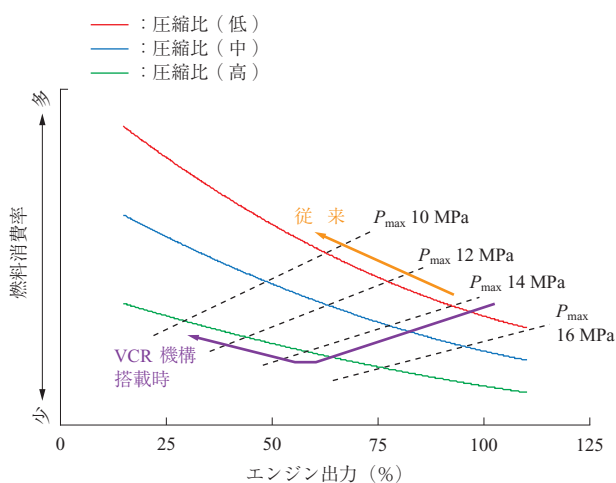
は着火性が悪化する。そのため、これらの次世代燃料に応じて最適な燃焼を実現させるためには、圧縮端温度の制御が有効となる。VCR機構を用いることで圧縮比を自在に変更し、圧縮端温度をコントロールできるため、燃焼性に難のある次世代燃料をエンジンに供給しても安定燃焼が実現できる。このように、将来想定される燃料でも安定してエンジンを運転できるため、就航船を燃料の変遷によって解体・新造する必要がなくなり、1隻当たり約13000tのCO₂排出量⁽¹²⁾が削減できる。国土交通省の調査によると、新規に建造されるコンテナ船は大型化しており、それに伴い新規の建造船数は減少しているものの平均して毎年100～150隻ほど建造されている⁽¹¹⁾。VCR機構の搭載によって、これらの新規建造船を減らすことができれば、CO₂排出量を大幅に削減できる可能性もある。

3.3 運航計画の自由度拡大による輸送時間の短縮

2020年の一般海域におけるSO_x規制の強化に伴い、低硫黄分燃料の生産方法の違いなどに起因して市場にはさまざまな燃焼特性をもった液体燃料が流通すると考えられる。ガス燃料に関してもシェールガスのような従来のLNG燃料に比べて燃焼特性が異なる燃料が市場に流通する可能性が考えられる。このため、既存船ではエンジンに適合する燃料をバンカリング（給油）するためだけに寄港する必要性が出てくる可能性がある。一方で、VCR機構を搭載したエンジンを有する船舶は、圧縮比を変えることでさまざまな燃焼特性を有する燃料に対応でき自由度が拡大するため、比較的バンカリングする燃料を問わない。そのため、荷役時など同時にバンカリングすることが可能となり、これによってバンカリングの時間を短縮できるとともに輸送時間の短縮が可能となり、かつ輸送コストの削減にも貢献できる。

3.4 レトロフィット化による既存船のメリット

IHI・IPS方式のVCR機構は、エンジン内の一部の部品（クロスヘッドピン、ピストン棒、連接棒、ガイドシュー）を変更することで成立する構造となっている。そのため、就航船にも容易にレトロフィット可能であり、これまで示したVCR機構によるメリットを享受できる。今後、EEDI（Energy Efficiency Design Index、エネルギー効率設計指標）規制の強化、SO_x規制、カーボンフリー燃料などへの燃料転換のために、新たに船を建造しなくとも就航船にVCR機構をレトロフィット化することで、これらの規制や燃料転換に対応可能となる。また、トータルで見るとCAPEX（CAPital EXpenditure、資本的支出）



第5図 VCR機構による実用出力域の燃料消費率の概念
Fig. 5 Concept of fuel consumption with VCR system

および OPEX (OPerating EXpenditure, 設備投資) は新造するよりも安価になると考えられる。

4. 結 言

大型船用エンジン向けの VCR 機構は世界初となる技術であり、2018 年のマリンエンジニアリング・オブ・ザ・イヤー (土光記念賞) を受賞したことから、世の中に注目されている技術であることは明らかである。これら IHI・IPS の研究成果が大いに評価され、近い将来の製品化を目指してライセンスである WinGD (Winterthur Gas & Diesel) 社と共同で商用化仕様の VCR 機構の開発に合意し、現在作業を鋭意加速中である。

この商用化仕様の VCR 機構が完成し、既報のとおり圧縮的シェアを保持中の X-DF 機関と組み合わせられたとき⁽¹³⁾、まさに循環型社会に大きく貢献可能な前人未踏の大型船用クロスヘッド型 2 ストロークエンジンとなると期待される。

参 考 文 献

- (1) 公益財団法人日本海事センター：外航海運 I / 日本の海運, <http://www.jpmac.or.jp/img/relation/pdf/pdf-p25-33.pdf>, (参照 2019. 9. 11)
- (2) Y. Masuda, H. Hirose, Y. Umemoto and T. Yamada : Innovative Development of Variable Compression Ratio System for Crosshead Type Low Speed Two Stroke Engines, Proceedings of the Internal Symposium on Marine Engineering, 2017, pp. 1:A01-202
- (3) 増田 裕, 廣瀬孝行, 山田 剛, 梅本義幸, 森山 功治 : クロスヘッド型 2 ストロークエンジン用可変圧縮比機構について, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 53, No. 6, 2018 年 11 月, pp. 124 - 129
- (4) Y. Masuda, H. Hirose, T. Yamada, Y. Umemoto, Y. Takimoto and K. Moriyama : Key Device Technologies to Realize the Unprecedented Variable Compression Ratio System of Two-Stroke Engine, CIMAC 2019, Paper No. 329, 2019
- (5) K. Moteki, S. Aoyama, K. Ushijima, R. Hiyoshi, S. Takemura, H. Fujimoto and T. Arai : A Study of a Variable Compression Ratio System with a Multi-Link Mechanism, SAE 2003 World Congress, Technical report SAE 2003-01-0921
- (6) S. Pischinger, K. I. Yapici, M. Schwaderlapp and K. Habermann : Variable compression in SI engines, Technical Paper SAE 2001-24-0050
- (7) H. Kleeberg, D. Tomazic, J. Dohmen, K. Wittek and A. Balazs : Increasing Efficiency in Gasoline Powertrains with a Two-Stage Variable Compression Ratio (VCR) System, 2013. 1, Technical report SAE 2013-01-0288
- (8) C. Constensou, P. Kapus, K. Prevedel and W. Bandel : Performance Measurements of a GDI variable compression ratio engine fitted with a 2-stage boosting system and external cooled EGR, 20th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology, 2011, Aachen Germany, pp. 1:1 369 - 1 388
- (9) W. Schöffmann, H. Sorger, S. Lösch, W. Unzeitig, G. Fraidl and A. Fürhapter : The 2-Step VCR Conrod System-Modular System for High Efficiency and Reduced CO₂, 2017 JSAE Annual Congress Proceedings, 2017, pp. 20175333
- (10) 小林正和, 橋口靖生, 澤田典一 : 減速運航の実態 - 減速運航の課題・対策及びその実績, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 49, No. 1, 2014 年, pp. 74 - 80
- (11) 玉井和久, 赤倉康寛 : 世界のコンテナ船の運航船腹量・船型の将来動向に関する分析, 2017 年 3 月, <http://www.yokohama-nippon-ships.com/kenkyuseika/pdf/ks0961.pdf>, (参照 2019. 9. 11)
- (12) A. Ringvold : Prospective Life Cycle Assessment of Container Shipping, Norwegian University of Science and Technology, 2017. 7
- (13) 株式会社 IHI 原動機 : 世界の海で環境性能をリードする船用エンジン, IHI 技報, Vol. 59, No. 3, 2019 年 9 月, pp. 22 - 25