

異常診断に向けた船用主機関シミュレーションの開発

ーデジタルエンジニアリングによる故障箇所推定手法構築の基礎的検討ー

正会員 小知井 秀 馬*
井 上 伸 一*
吉 村 裕 史**

渡 部 潤*
小木曾 誠 人**

Development of Marine Main Engine Simulation for Abnormality Diagnosis
- The Study of Failure Detection Method Based on Digital Engineering -

by Shuma Kochii, Member Jun Watabe
Shinichi Inoue Makoto Ogiso
Hiroshi Yoshimura

Key Words: Main Engine, Simulation, Failure Detection, Decarbonization, Digital Engineering

1. 緒 言

近年、国際海運の脱炭素化に向けた機運はかつてない高まりを見せている。実際、2023年に開催されたIMO(国際海事機関)のMEPC 80(第80回海洋環境保護委員会)では、2050年までにGHG50%排出削減としていた従来目標に対し、2050年頃までにネットゼロとする野心的な目標が採択されている¹⁾。船舶の脱炭素化に向けて動力源たる主機関の燃料転換は必要不可欠であるが、燃料転換の早期実施が難しい内航船をはじめとして、既存の石油系燃料船の最適化も同様に重要である。内燃機関は海気象条件や燃料性状といった実際の稼働状態によって性能が大きく左右されるため、広範な条件下でエミッション監視をして動作状況を管理することが求められる。特に、船舶の運航中は避けられない部品の経年劣化や厳しい条件下での運転を強いられることも多々あり、様々な対策を施したとしても主機関の不具合や異常が発生し、燃焼効率低下に伴うエミッション悪化として環境性能に影響が生じている懸念がある。このような背景から、主機関の状態を定量的に診断する事で、より確実に異常の未然防止や早期発見を実現する手法の開発が注目されている²⁾。

2. 先行研究

このような要求に先行した事例の一つとして、自動車業界における取り組みが挙げられる。自動車業界では2017年より欧州でRDE(Real Driving Emissions³⁾)が導入され、現在では世界各国で実稼働状態での厳しい規制が課

せられている。これに対応するためにOBD(On-Board Diagnostics⁴⁾)と呼ばれる、対象の故障モードをセンサで自動検出および特定記録する計測技術を活用し、全車でエミッションを一定以下に抑えることに成功している。

一方で、船用主機関のような大規模プラントに対しては、ベンチテストや実機による実証を行うことは容易ではなく、デジタルエンジニアリングによるアプローチが有効な手法として期待される。海事業界に見ると、エンジンメーカーでは目的に応じたシミュレーションを活用した設計開発などの例⁵⁾はあるものの、実運転データからモデル精度を向上させた上で、故障診断手法や最適運航手法開発に活用している報告例は少ない。これに対しPagán⁶⁾らは、1次元熱力学シミュレーションモデルとテストベンチに基づく故障したディーゼルエンジンの診断システムを検討しており、本船で通常モニターされる変数による故障の早期発見を提案している。また、通常は本船で監視しないパラメータにも着目しており、これら特徴量の診断システムでの利用についても言及している。

海運業界においても船舶運航データ収集と特徴量変化から各機器の状態診断を行う試みは進んできているが、その分析手法はドメインナレッジの知見や経験に頼るところが大きい。加えて、巨大プラントである船舶において全ての特徴量を把握することは不可能である。機関故障によるエミッション増加を極力低減したい運航者としては、故障による機関プラントの特徴量変化を理論的に把握し、計装点や診断ロジックを検討して本船仕様に反映させることが求められている。

3. 本研究の目的

本研究では、対象分野に多くの知見を有するトヨタ自動車協力のもとで、故障による機関プラントの特徴量変化を理論的に把握するための船用主機関シミュレーションを開発することを目的とする。開発するシミュレーションでは主機関の諸変化を把握し、各故障シナリオにお

* 株式会社 MTI (Monohakobi Technology Institute)

** トヨタ自動車株式会社

いて故障プロセスと特徴量変化の詳細を解明することが可能となる。必要変数と計測点の選定および診断手法の検討においては自動車の OBD 技術を参考とし、理論的裏付けに基づいた定量的かつ詳細な主機状態把握とエミッション監視手法を構築することを目指す。

4. シミュレーションモデルの開発

本研究では、90 型石炭専用船の能代丸に搭載されているジャパンエンジンコーポレーション製の 7 気筒エンジン 7UEC60LSE-Eco-A2 を対象に 1 次元のシミュレーションモデルを開発している。開発にはエンジン解析に多く用いられる GT Power⁷⁾ を使用して完成図書から設計情報を取得しモデル化しており、Fig. 1 に示すように過給機と空気冷却器、掃気系統、燃焼室、および排気系統からなるエンジンプラントを構築している。

筒内の燃焼ソルバには拡散燃焼の予測モデルである DI Pulse を使用している。本モデルは GT Power にて提供されており、噴射された燃料の蒸発、拡散、混合、燃焼を現象論的に再現できる⁸⁾。なお、エンジンの制御については Fig. 2 に示すように、現在回転数と目標回転数の差分による PID 制御にて燃料噴射量を決定しており、外部負荷には能代丸の計画カーブから算出された出力をトルクに変換しインプットしている。また、過渡応答における適合条件としては、各回転数と負荷の組み合わせにおける定常状態にて解析を実施し、最適燃費となる様に燃料噴射タイミングと排気弁閉タイミングを決定している。

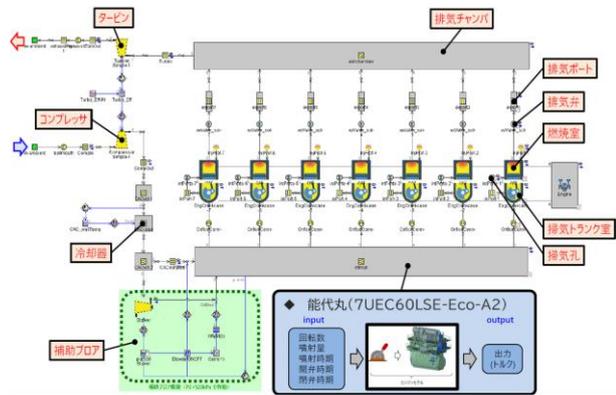


Fig. 1 Simulation Model of Main Engine.

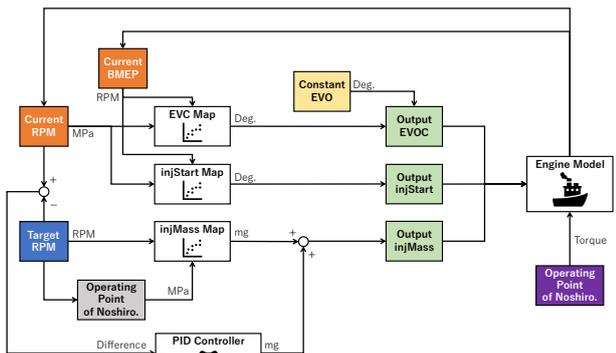
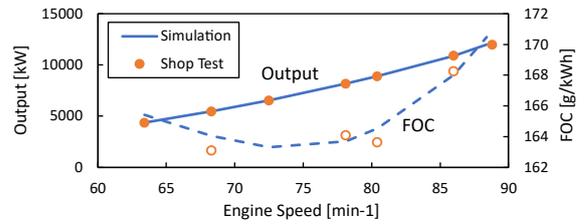
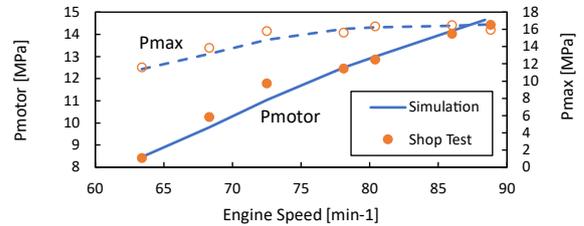


Fig. 2 Control Block Diagram of Main Engine.



(a) Output (Left) and FOC (Right).



(b) Pmotor (Left) and Pmax (Right).

Fig. 3 Comparison of Simulation and Shop Test Results vs. Engine Speed.

シミュレーションモデルの性能評価としては、各動作点において計算を実施し、エンジン出荷時データとできる限り良好な一致を示すようにパラメータチューニングによるモデル改修を実施した。Fig. 3 には代表指標として Fig. 3 (a)左軸に出力、Fig. 3 (a)右軸に燃費 (FOC : Fuel Oil Consumption) , Fig. 3 (b)左軸に筒内圧の Pmotor (圧縮圧力) , Fig. 3 (b)右軸に Pmax (最高圧力) について、シミュレーション解析結果 (青線) とショップテスト結果 (橙点) で比較している。なお、上記解析ではショップテスト結果と比較を行うために、エンジン制御の目標値を平均有効圧とすることで、機関出力がシミュレーションとショップテストで一致するようにしている。主機モデルのパラメータチューニングを実施する場合、細かな変更が各機器の状態に影響を及ぼすため、シミュレーション結果はショップテスト結果と完全一致とはまだはかないものの、Fig.3 からわかる様に出力/燃費カーブをはじめとして燃焼に関する代表値も良好な一致を示しており、十分に性能解析が実施できるモデルを構築できたと判断した。

5. 機関故障のモデル化

5.1 着目する故障

本章では、開発した船舶主機関シミュレーションに故障モデルを実装し、故障発生時の挙動解析を実施する方法について説明する。本研究では、エミッション増加に大きな影響を及ぼすと想定される燃焼室周りの部品に着目して、ピストンリングの折損、燃料噴射弁の噴孔拡大、排気弁の吹き抜けという三つの故障に着目する。各故障について、発生する事象をシミュレーション上でモデル化することにより諸変数へ及ぼす影響を調査する。

5.2 ピストンリング折損のモデル化

ピストンリングは、シリンダ内において燃焼ガスが漏れない様に密閉しているリング状の部品である。常に高温高圧の条件に曝されているため、メンテナンス不良な

どの場合には折損し、下部の掃気室に燃焼ガスが吹き抜けるブローバイが発生すると想定される。

本故障を再現するために、Fig.4の左図に示すようにシリンダ内から掃気室に仮想的な空気の連通路を設置することで、意図的に燃焼ガスの漏洩をモデル化した。また、連通路にはオリフィスを設置し、この直径を変更することで折損の度合いを再現した。Fig.4の右図にはブローバイをモデル化した後に解析を実施した際のオリフィスに流れる空気流量および筒内圧と掃気室圧を示しているが、筒内圧が掃気室圧を上回っている際には差圧で大量の燃焼ガスが掃気室に流れている様子が確認できる。

5.3 燃料噴射弁噴孔拡大のモデル化

燃料噴射弁は、高圧状態の燃料油を燃焼室内に噴射する役割を担っており、噴霧した液滴の状態が燃焼状態を大きく左右する重要部位である。本研究では燃料噴射弁の構造のうち噴霧条件や噴射速度に強い相関がある噴射ノズル孔の拡大に注目しモデル化する。

本故障を再現するために、燃焼ソルバ DI Pulse モデルにおけるノズル径を変更して解析を実施した。モデルの詳細は割愛するものの、ノズル径 D_n が直接影響を及ぼすパラメータは式(1)に示す微粒化時間 t_b と式(2)に示す平均粒径 D_d である。

$$t_b \propto \sqrt{\frac{2\rho_{fc} D_n}{\rho_a C_n U_i}} \quad (1)$$

$$D_d \propto D_n \cdot f\left(Re, We, \frac{\rho_{fc}}{\rho_a}\right) \quad (2)$$

ここで、 ρ_{fc} は筒内での燃料密度、 ρ_a は空気密度、 C_n はノズル流量係数、 U_i は初期噴流速度、 f は関数、 Re はレイノルズ数、 We はウェーバー数である。噴孔から噴射された燃料は微粒化時間 t_b まで円柱状で筒内を進み、その後小さな液滴に分裂するが、式(1)よりノズル直径が拡大することで t_b は延長され燃焼が遅れることがわかる。なお、ノズル直径変更によりノズル流量係数は小さくなるが、同様に t_b は延長される。また、式(2)よりノズル直径が拡大することで、微粒化された液滴の平均粒径 D_d は増大する。形成された液滴は周囲の高温ガスにより熱せられて蒸発し着火に至るが、液滴の蒸発速度は液滴質量 m_d の時間変化として式(3)のようになる。

$$\frac{dm_d}{dt} \propto -D_d \cdot \rho_c \cdot \alpha \cdot Sh \cdot f(B_m) \quad (3)$$

ここで、 ρ_c は筒内ガス密度、 α は拡散係数、 Sh はシャーウッド数、 B_m は質量分率から求まるパラメータである。式(3)からわかる様に液滴の蒸発速度は液滴直径 D_d に1次で比例することから、燃料噴射弁から総量が同じ燃料が噴射され噴霧化するとき、複数の液滴に分かれた方が燃料全体での総蒸発量は多くなる。すなわち、噴孔の拡大により一つの液滴あたりの燃料蒸発量は増えるが、筒内全体

で見たときの時間あたりの着火できる蒸発燃料は少なくなる。このように、ここでは簡単な考察に留めるが燃料噴射弁の噴孔が拡大することにより、燃焼悪化や着火遅れを再現することができる。

5.4 排気弁吹き抜けのモデル化

排気弁は、シリンダ内において燃焼終了時に近いタイミングで開くことで、燃焼済みの排気ガスの流れを制御し、エンジンの外に送り出す機能を持つ。高温の排気ガスに直接触れるため変形しやすい環境に曝されており、燃料油の燃焼生成物や残渣物による腐食などをきっかけに、ガス漏れすなわち排気弁の吹き抜けが発生する。

開発したシミュレーションモデルでは、排気弁の流量特性を決定するために、Fig.5に示すようにCFD解析を実施しており、排気弁リフト量に対する実用流量係数を決定している。そこで、排気弁の吹き抜けをシミュレーションするため、対象シリンダの排気弁における最小リフト量を開く方向にオフセットすることで、意図的に排気弁における燃焼ガスの吹き抜けをモデル化した。なお、それぞれの条件における解析結果を比較するために、Fig.6左軸に示すように基本的なリフトカーブは変更せず、閉タイミングにおいて僅かに開口させておくことで故障を再現した。これにより、Fig.6右軸からわかる様に、燃焼中のTDC(Top Dead Center)付近にて燃焼ガスが排気管へ吹き抜けている様子を確認できる。

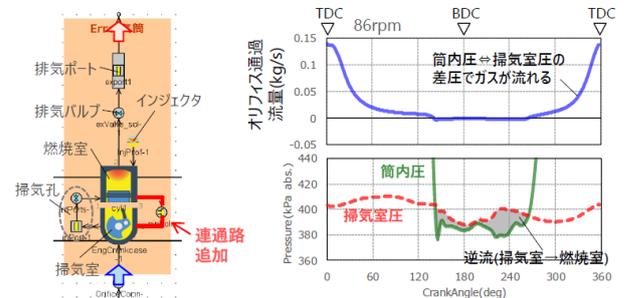


Fig. 4 Modeling of Blow-by on Simulation.

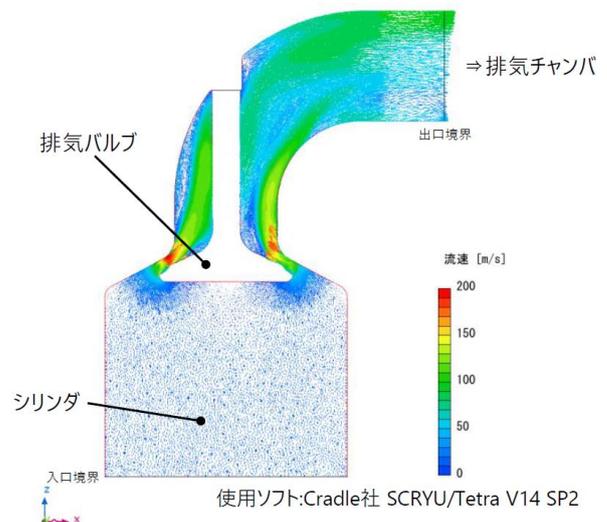


Fig. 5 Modeling of Exhaust Valve Blowing.

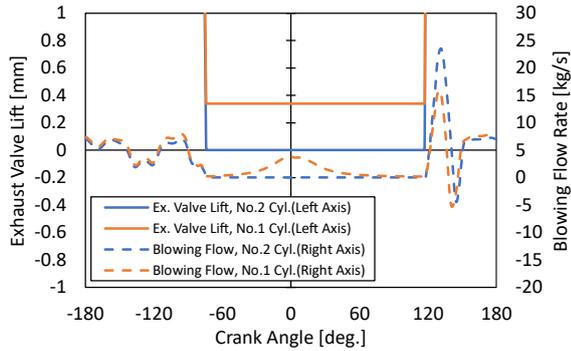


Fig. 6 Exhaust Valve Lift Curve (Left) and Blowing Flow Rate from Cylinder (Right) vs. Crank Angle.

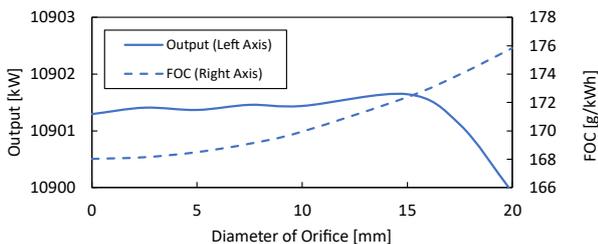
6. データによる機関故障の検証

6.1 ピストンリング折損の挙動解析

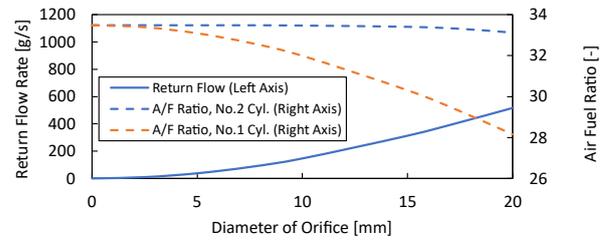
ピストンリング折損時の挙動解析を行うため、7シリンダのうち No.1 Cyl.のみに 5.2 節で示したブローバイを発生させ、回転数 80 rpm かつ目標出力 10,900 kW として解析した。Fig. 7 には解析結果として、故障モデルとして定義した仮想的な空気の連通路路配管のオリフィス径 (=ブローバイによる吹き抜け度合い) に対する諸変数を示す。ブローバイが発生しても Fig. 7 (a)左軸からわかる様に機関出力は一定で制御できているが、Fig. 7 (a)右軸のように故障が進展すると燃費が悪化していることが確認できる。

燃費悪化の原因は下記のように考察できる。まず、連通路路配管径が拡大すると Fig. 7 (b)左軸の様にブローバイによる吹き抜け量は増大しており、Fig. 7 (c)左軸の様に不具合シリンダ (No.1 Cyl.) における Pmotor が下がるとともに燃焼ガスが掃気空気に混ざることになる。結果として、Fig. 7 (b)右軸のように掃気空気の A/F (Air Fuel Ratio : 空燃比) は低下、すなわち酸素量が低下する。これにより、不具合シリンダにおいて Fig. 7 (c)右軸の様に Pmax 低下と Fig. 7 (d)左軸の様に排ガス温度上昇が確認され、ピストンリング折損の故障により燃焼悪化を引き起こす。

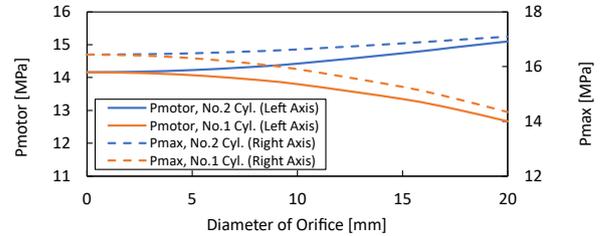
なお、ブローバイの場合では不具合シリンダで大幅に排気ガス温度が上昇するため、過給機には多くの排気エネルギーが流入し回収することになる。そのため、Fig. 7 (d)右軸からわかる様に掃気圧上昇による正常シリンダでの燃焼改善 (=Fig. 7 (c)右軸における Pmax の増加) が副次的に発生する。一方で、同時に発生している不具合シリンダにおける燃費悪化の影響が支配的であり主機全体での燃費は悪化する。



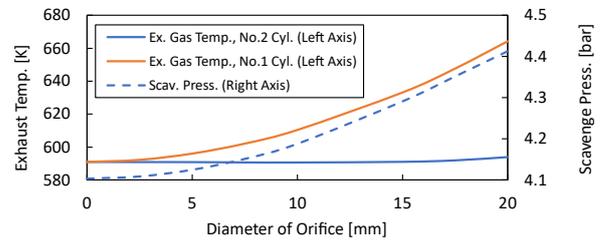
(a) Output (Left) and FOC (Right).



(b) Return Flow Rate (Left) and A/F Ratio (Right).



(c) Pmotor (Left) and Pmax (Right).



(d) Exhaust Gas Temp. (Left) and Scavenge Pressure (Right).

Fig. 7 Simulation Results of Blow-by vs. Diameter of Orifice.

6.2 燃料噴射弁噴孔拡大の挙動解析

前節と同様に 7シリンダのうち No.1 Cyl.のみに 5.3 節で示した燃料噴射弁の噴孔拡大を発生させ、回転数 80 rpm かつ目標出力 10,900 kW として解析した。Fig. 8 に解析結果として、燃料弁の噴孔径に対する諸変数を示す。ブローバイ発生時と同様に Fig. 8 (a)左軸のように機関出力に変化は見られないが、Fig. 8 (a)右軸のように噴孔拡大に伴い燃費は悪化する。

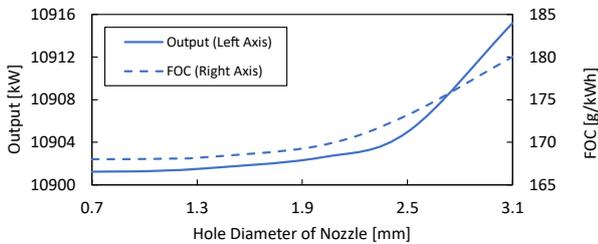
まず、燃焼モデルから考察した現象の予想について確認するため、着火遅れの指標として MBF2 (2% Mass Burned Fraction = 質量燃焼率) について、燃焼悪化の指標として MBF50 について、それぞれ Fig. 8 (b) に示す。なお、MBF は熱力学の第一法則から導出される式(4)に示す受熱量 Q に対し、サイクル中での最大受熱量に対する割合から該当するクランク角を算出した。

$$Q = \int dQ = \int \frac{1}{\kappa - 1} V dp + \frac{\kappa}{1 - \kappa} p dV \quad (4)$$

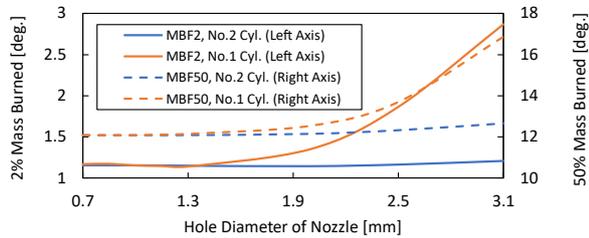
ここで、 κ は比熱比、 p は筒内圧力、 V はシリンダ容積であり、比熱比の変化量の項 $d\kappa$ は無視している。噴孔径が拡大すると、Fig. 8 (b)左軸から確認できるように一定量を超えると着火タイミングが遅れ始めることが確認できる。また、正常シリンダと不具合シリンダのクランク角度差は、解析した最大噴孔径で見ると着火遅れ時点 MBF2 で

約 1.7 deg.であるのに対し、燃焼中盤 MBF50 では約 4.2 deg.に増加しており、故障のモデル化により燃焼状況が悪化し後燃えの傾向になっていることが示唆される。故障の影響としては、着火遅れに伴い Fig. 8 (c)の右軸からわかる様に正常シリンダと比較して不具合シリンダの Pmax は減少傾向にあり、Fig. 8 (d)左軸の様に不具合シリンダの排気ガス温度は噴孔拡大とともに増加する。

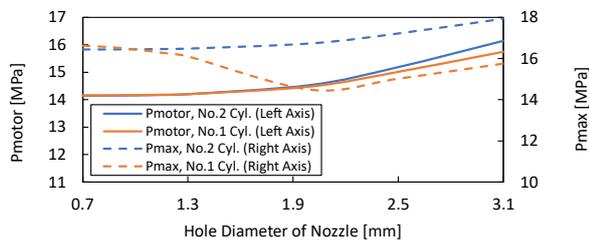
なお、ブローバイの際と同様に不具合シリンダからは不要に排気ガスにエネルギーが流出するため、過給機により取り出せるエネルギーは増え Fig. 8 (d)右軸の様に掃気圧は増加する。これにより、Fig. 8 (c)左軸の様に正常シリンダでの Pmax は若干の増加をしており、加えて噴孔が一定量を超えると不具合シリンダについても掃気圧増加による燃焼改善効果が燃焼悪化の効果を上回っていることも確認できる。しかしながら、不具合シリンダでの燃費は噴孔拡大前の燃費性能より良くなることはなく、主機全体としては燃費が悪化するという結果になる。



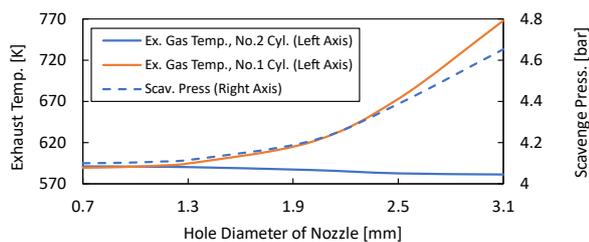
(a) Output (Left) and FOC (Right).



(b) MBF2 (Left) and MBF50 (Right).



(c) Pmotor (Left) and Pmax (Right).



(d) Exhaust Gas Temp. (Left) and Scavenge Pressure (Right).

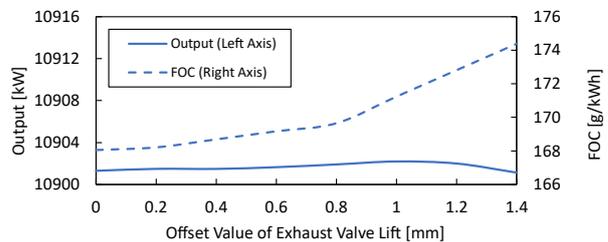
Fig. 8 Simulation Results of Increased Nozzle Diameter vs. Hole Diameter of Nozzle.

6.3 排気弁吹き抜けの挙動解析

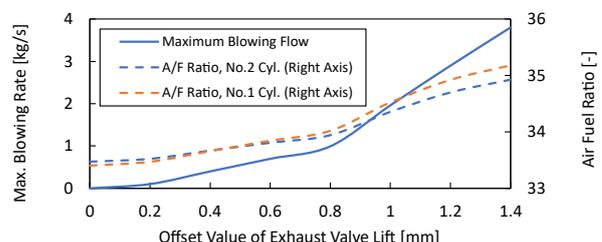
前節までと同様に、7 シリンダのうち No.1 Cyl.のみについて 5.4 節に示した排気弁吹き抜けを生じさせ、目標回転数を 80 rpm、目標出力を 10,900 kW として解析した。Fig. 9 には解析結果として、排気リフトのオフセット量に対する諸変数を示す。他故障と同様に、本条件でも Fig. 9 (a)左軸から確認できるように機関出力は殆ど一定を保っているが、Fig. 9(a)右軸のように故障が進行すると、主機関全体での燃費は悪化している。

まず、排気弁吹き抜けの状態について確認するため、異常シリンダにおける最大吹き抜け流量を Fig. 9 (b)左軸に示す。Fig. 9 (b)左軸からわかるようにオフセット量の増加に伴い排気弁での吹き抜け量は増加しており、故障をモデル上で再現できていることが確認できる。次に本故障のプロセスについて順を追って整理すると、閉弁不良により不具合シリンダにおいて燃焼ガスが排気管に流れることが想定され、Fig. 9 (d)左軸を見ると排気温度が著しく上昇していることが確認できる。他故障と同様に、不具合シリンダでの排気温度上昇は主機関全体での掃気圧上昇に影響する。結果として、Fig. 9 (b)右軸のように A/F リッチすなわち空気が多く供給され、Fig. 9 (c)のように正常シリンダにおける Pmotor の増加と燃焼改善 (= Pmax 増加) が確認できる。

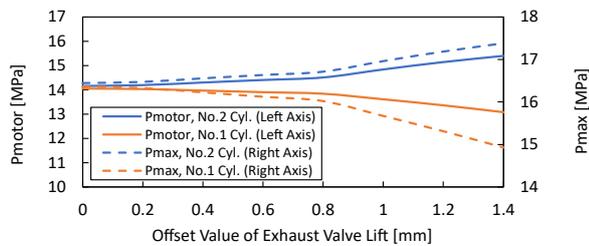
なお、本故障の場合は単に不具合シリンダにおいて排気ガスが吹き抜けるだけであるので掃気空気への直接的な影響はなく、他故障とは異なり当該シリンダにおいても掃気圧増加の影響を受けて空気量が確保され、A/F は上昇している。一方で、Fig. 9 (c)のように排気管にガスが逃げる分、圧縮行程においてエンタルピー流出が存在しているため Pmotor と Pmax の両方で減少となり十分に動力を回収できていない。結果として、主機関全体としては必要出力を実現するために多くの燃料を投入する必要があるが生じており燃費悪化につながっていると考えられる。



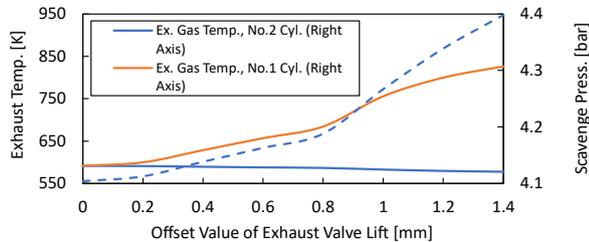
(a) Output (Left) and FOC (Right).



(b) Maximum Blowing Rate (Left) and A/F Ratio (Right).



(c) Pmotor (Left) and Pmax (Right).



(d) Exhaust Gas Temp. (Left) and Scavenge Pressure (Right).

Fig. 9 Simulation Results of Exhaust Valve Blowing vs. Offset Value of Exhaust Valve Lift.

7. 考 察

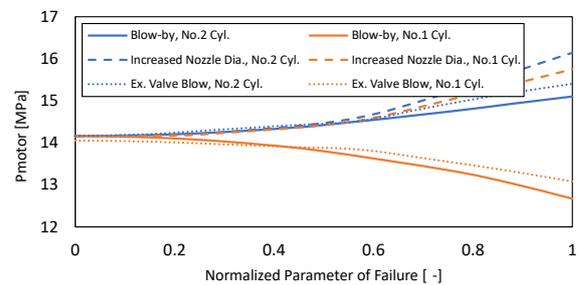
前章では、シミュレーションを利用した故障の検証により、主機関に及ぼす影響のプロセス詳細分析ができることを示した。想定した故障は3ケースのいずれも不具合シリンダにおいて燃焼が悪化し Pmax が低下、排気温度が上昇して掃気圧の上昇、正常シリンダでは燃焼改善により Pmax が増加する。これら故障を診断するためには、計測点の追加により故障を分類することが必要である。一方で、実際の本船を想定した場合には、存在する全てのパラメータを取得することは不可能である。そのため、現場レベルで計測が可能なシンプルなパラメータとロジックで診断を行い、故障の早期発見と対処が求められる。上記について考察をするため、各故障について影響が顕著に表れる特徴量を探索し、診断ロジック構築を検討する。

まず、故障の発生兆候の監視には、上記に示した3ケースで共通していた排気温度の増加および Pmax の低下が有効な指標である。これにより、不具合が疑われるシリンダを特定できる。次に、排気弁やピストンリングの吹き抜けでは圧縮行程においてガス流出が生じるため、Pmotor の確認が診断に有効である。Fig. 10 (a)には各故障について、故障の度合い(連通経路径、噴孔径、排気弁リフトのオフセット値)を最大値で正規化した指標に対する Pmotor について、正常と異常シリンダそれぞれで示している。故障の発生により掃気圧が上昇し Pmotor は増加するが、排気弁とピストンリングの吹き抜けでは Pmotor が低下していることが確認できる。

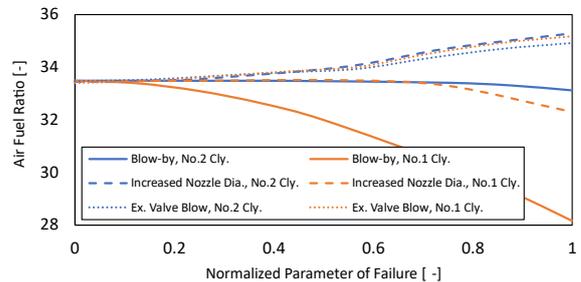
吹き抜けが発生する2ケースの判別には、掃気空気の状態を確認することが有効である。Fig. 10 (b)には Fig. 10 (a)と同様に正規化した故障度合いに対する A/F をプロットしている。ピストンリングから燃焼ガスが吹き抜けた場合、掃気空気に混ざって再度燃焼室に吸入されるため

酸素濃度は低下し不具合気筒での A/F は低下する。一方で、排気ガス吹き抜けの場合には吹き抜けたガスは排気マニホールドに排出されるため A/F は正常シリンダと異常シリンダで有意な差が生じない。このように、圧縮行程の異常については、燃焼ガス成分を分析することが有効であり、このような計測は A/F センサ(全領域型の酸素センサ)を用いることで判定できる。

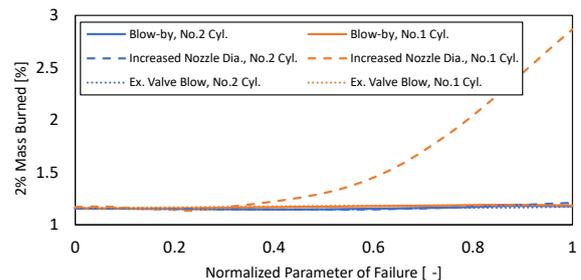
なお、圧縮行程の判別から除外した噴孔拡大については、燃料の噴射タイミングに対する着火遅れや後燃えを確認することで故障モードの特定を行うことができる。Fig. 10 (c)や Fig. 10 (d)に示すように、燃料の噴射タイミングや噴射期間を変更していないにも関わらず、着火の遅れ(2%MBFの遅角)や後燃え(50%MBFの遅角)が確認される場合には、燃料噴射弁の異常が疑われる。



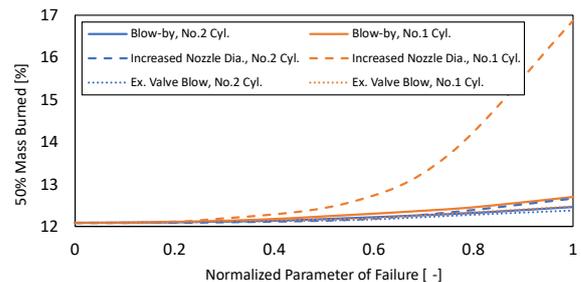
(a) Pmotor vs. Normalized Parameter of Failure.



(b) A/F Ratio vs. Normalized Parameter of Failure.



(c) 2% MBF vs. Normalized parameter of Failure.



(d) 50% MBF vs. Normalized parameter of Failure.

Fig. 10 Feature Parameters for Failure Detection.

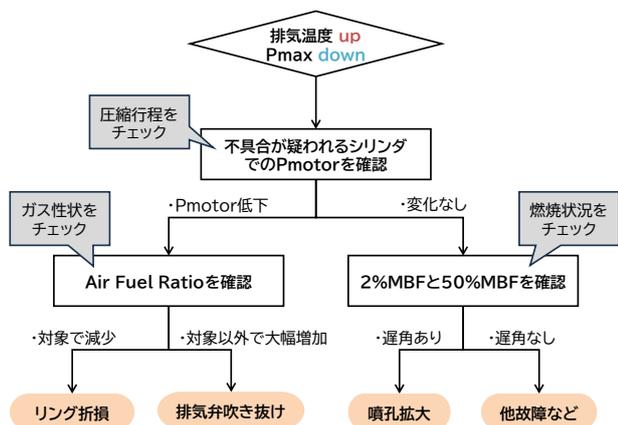


Fig. 11 Flow Chart of Failure Detection.

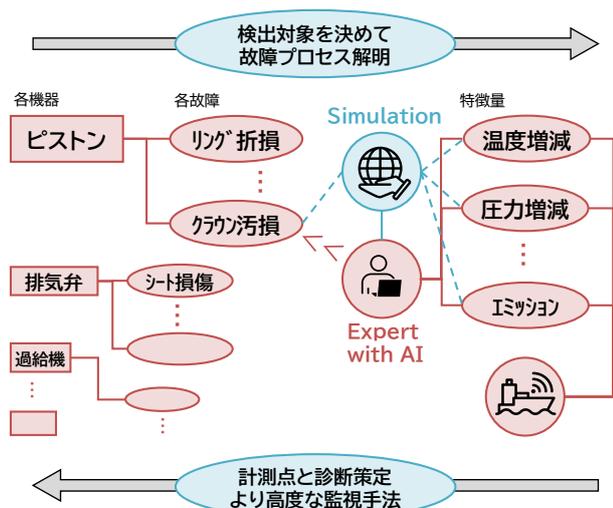


Fig. 12 Failure Detection Scheme Aimed in this Research.

ここまでで考察した故障診断について診断フローチャートとしてまとめると Fig. 11 の様になる。このように、故障プロセスを考察し各現象における特徴量変化を監視することで、故障箇所が特定できるロジックを構築することが可能になる。本稿では、燃焼室を中心に3ケースのみについて考察を実施したが、運航者として蓄積している知見により、主機関の各対象機器における想定される故障、故障によって引き起こされる事象を整理しシミュレーション解析を実施し、パラメータスタディを行うことで、網羅性の高い故障診断手法構築が期待できる。

8. 結 言

本研究では、定量的かつ詳細な主機状態把握とエミッション監視手法の構築を目指し、船舶主機関シミュレーションを開発した。また、エミッション増加に影響を及ぼすと想定される燃焼室周辺機器について、ピストンリング折損、燃料噴射弁噴孔拡大、排気弁吹き抜けという3ケースのモデル化とシミュレーションモデルへの適用指針を検討した。従来はドメインナレッジに頼らざるを得なかった運航者としての異常診断について、各機器故障と特徴量変化を一貫して解析し、理論的な判断を支援するシステム実現に寄与している。また、先行研究において適

用可能性が示唆されていた、通常は本船で監視しないパラメータについて、有効な特徴量の抽出と計測点の策定を検討した。現象として圧縮行程、燃焼状況、ガス性状を取り上げ、計測項目として筒内圧と A/F を利用することで各故障の診断ロジックを構築している。

今後の課題としては、各故障プロセス解析の信頼性確認と検討した計装案の実証となる。海運会社には、運航中に得られる膨大なデータと実際の故障レポートなどが多く蓄積しており、今回開発したシミュレーションモデルと本船から取得したデータとの比較検証を進めていく。また、診断ロジックの構築に於いて、船員の専門知識や経験もまた必要不可欠であり、ドメインナレッジを組み合わせることが重要である。さらには、新燃料転換や新技術搭載では、まだ見ぬトラブルに見舞われる可能性も十分にある。そこで、今後はより多くの故障事例や想定に対し、シミュレーションによりケーススタディを実施し、Fig. 12 に示すような故障診断スキームの構築を目指す。これにより、定量的な故障診断マニュアルを作成により迅速な予防保全を実現し、エミッション管理を始めとして健全な状態での船舶運航を実現していく。

謝 辞

本研究はトヨタ自動車株式会社様の技術コンサルティングを通じて、多大なるご支援とご尽力を賜り実現したものです。竹中様、安田様を始めとしまして、関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) IMO: Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, Resolution MEPC.377(80), 2023.
- 2) Wang J. *et al.*: Intelligent Fault Diagnosis of Marine Diesel Engines Based on Efficient Channel Attention-Improved Convolutional Neural Networks, *Processes*. 11(12), 3360, 2023.
- 3) Ameya Joshi: Review of Vehicle Engine Efficiency and Emissions, *SAE Int. J. Adv. & Curr. Prac. in Mobility* 4(5), 1704-1733, 2020.
- 4) 青野ら: 世界的な規制に対応した自動車エンジンの故障診断, 計測と制御, 55 巻第 3 号, p.214-220, 2016.
- 5) 梶谷ら: 船用エンジンデジタルツインとモデルベース開発 -三井 E&S における船用エンジンの HILS 構築と活用 -, 日本船舶海洋工学会誌, 112 号, pp.14-18, 2024.
- 6) Pagán Rubio, J.A. *et al.*: Marine diesel engine failure simulator based on thermodynamic model, *Applied thermal engineering*, 144, pp. 982-995, 2018.
- 7) Gamma Technologies, LLC: Software Overview What is GT Power, <https://www.gtisoft.com/gt-power/>, (参照 2024-2-1)
- 8) Hoang Nguyen Khac *et al.*: Model predictive control for a multiple injection combustion model, *Open Engineering* 2021, 11, pp. 1134-1140, 2021.