

主機関 1D シミュレーションを用いた故障診断と船舶運航への応用に関する考察

株式会社 MTI ◎小知井 秀馬 渡部 潤 大石 智生

日本郵船株式会社 井上 伸一

トヨタ自動車株式会社 小木曾 誠人 吉村 裕史

1. 緒 言

海運業界における脱炭素化の機運は高まっており、主機関においても GHG の排出削減に向けた設計開発が進められている。一方で、内燃機関は海気象や部品の経年劣化など実際の稼働条件に応じて性能が左右され、出荷時の想定とは異なる運転状態となっている懸念がある。そのため運航者の視点としては、主機関の性能変化を適切に診断し、稼働状態に応じた最適な運用が求められている。そこで本稿では、主機関シミュレーションモデル開発による故障プロセスの解明を応用し、実稼働条件下での最適運用に向けた制御パラメータ適合について考察する。

2. シミュレータ開発と故障診断

筆者らは、1D-CFD ツールである GTPower を利用して船用主機関の 1 次元シミュレーションモデル構築、ならびに故障プロセスの分析による主機状態診断手法を開発している¹⁾。本モデルでは図 1 に示すようなエンジンプラントを構築しており、Navier-Stokes 方程式や予測燃焼モデルに基づき、エンジン内部のガス流れや燃焼計算を詳細に解析できる。

構築したモデルは、別途開発した主機関の ECU モデルと接続しており、出荷時試験結果と一致する様にパラメータチューニングを実施した。さらに本モデルに各故障モデルを組み込むことで、故障プロセスの解明を行い、状態監視のための診断手法を構築した。例として、シリンダ内から掃気室への仮想的な連通路をモデル化することによる、ピストンリング劣化時のブローバイ再現例を図 2 に示す。本解析により、排ガス温度や燃焼消費率といった故障発生時の諸変数変化を観察でき、燃焼圧力や空燃比の計測による故障診断指針を提案した。

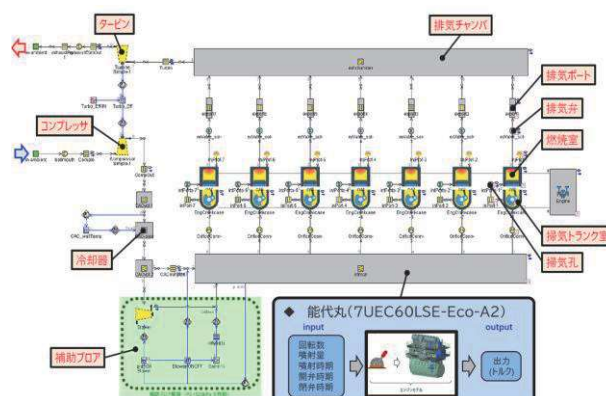


図 1 主機関シミュレーションの概要

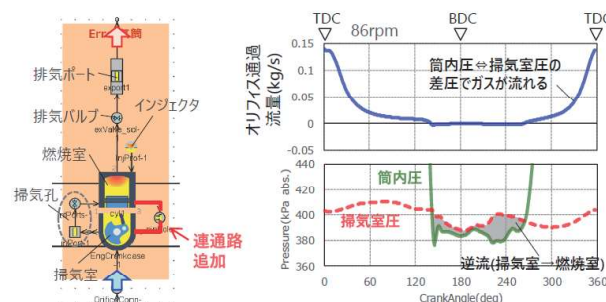


図 2 ピストンリング劣化のモデル化

3. 船舶運用への応用に関する考察

主機関の電子制御システムが登場したことで、バルブタイミングや燃料の噴射時期など様々なパラメータを自由自在に決定できる。そのため、エンジンの開発では制御適合という工程として、運転条件に応じて燃費や排気ガスの性状といった評価項目が最適値となる様にパラメータチューニングを実施している。適合手法の一つとして、設計変数に対する応答変数の近似曲面を作成し、最適条件を探索する応答曲面法は有効な手法である。応答曲面を作成するには、各動作条件について実験を実施しエンジンの諸項目を計測する必要がある、多くの工数を要する。

この課題に対し、シミュレーションの活用は有効であり、実機の挙動を再現した仮想エンジンで最適解を探索できる。図3は本研究で開発した主機関モデルを活用し、特定の動作点（68.3 rpm×5,455 kW）において、排気弁閉じタイミング（EVC : Exhaust Valve Close Timing）と燃料噴射タイミングを変更した際の燃費性能を応答曲面として解析した結果である。ここで、二つある曲面のうち下部は健全時、上部は1シリンダ当たり約150g/sのブローバイを発生させ健全時と同様の回転数と平均有効圧に設定した際の応答である。通常は、出荷時において各動作点に応じた健全時の応答曲面を作成し、Pmax や NOx 規制をクリアした動作制限範囲内で燃費が最小となる制御パラメータを決定する。しかし、図3に示した様に部品劣化時などには、想定していた応答曲面が変化するため、実稼働条件下では最適化されていない状態での運用となっている懸念がある。

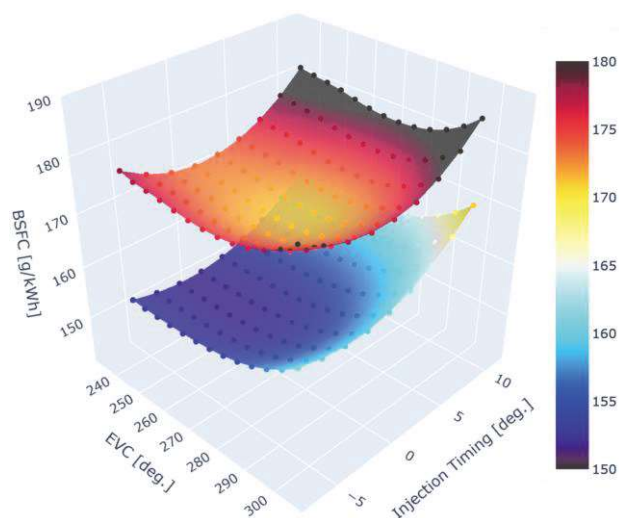


図3 EVC と噴射時期に対する燃費性能の応答曲面

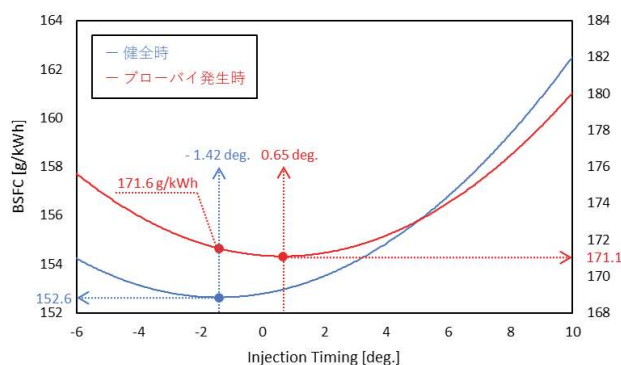


図4 EVC = 270 deg.固定時における燃費性能の応答曲線

表1 健全時と劣化時の適合解比較

	EVC [deg.]	Inj. Time. [deg.]	BMEP [bar]	Pmax [bar.]	BSFC [g/kWh]
健全時（適合解）	255	-2	10.81	173.0	152.3
劣化時（適合前）	255	-2	10.95	182.3	172.8
劣化時（適合解）	270	0	10.94	153.2	171.1

そこで、図4にはEVCを270 deg.に固定した際の噴射タイミングに対する燃費性能を示している。ここで、青線は健全時、赤線はブローバイ発生時の応答である。図3からわかる様に、健全時とピストンリング劣化時で応答曲面の変化と適合点の移動が確認できる。実際にはEVCも変更できるため、図3の応答曲面で適合解を求めた場合には表1のようになる。表1から確認できる様に、劣化時に再適合した場合は、しない場合と比較して約1.7 g/kWhの燃費改善が期待できる。また、主機運転範囲としてPmaxが170 bar.以下という設計条件を定めても、再適合により約1.0 g/kWhの取り代を得られる結果を得た。

4. 結 言

主機関の1Dシミュレーション開発と機関部品が故障した際の挙動解析を実施し、制御パラメータ再適合の必要性を示した。また、本故障シミュレーションと応答曲面法を活用した実稼働条件下での最適化手法の方針を示した。今回はパラメータスタディとしてピストンリングの劣化を取り扱い制御適合について考察したが、他種類の経年劣化や故障発生時にも同様に再適合による性能改善が期待できる。

今後の課題としては、運航中の本船での定量的な制御パラメータ設定方法の策定が挙げられる。本手法を応用した各故障における最適化と、本船から実際に得られる運航データを活用したシミュレーションの精度向上を組み合わせ、実稼働条件下で有効な最適運用指針の策定を目指す。

参考文献

- 1) 小知井ら，異常診断に向けた船用主機関シミュレーションの開発，日本船舶海洋工学会講演会論文集，第38号，pp.165-171.