

船用機関シミュレーションによる 故障箇所推定手法の構築

2023年12月4日

株式会社MTI 船舶物流技術グループ
機関システムソリューションチーム
研究員 小知井秀馬

目次

1. 緒言
2. 船用主機関シミュレーションモデルの開発
3. 機関故障の解析と実験
4. 故障箇所推定手法の構築
5. 結言

目次

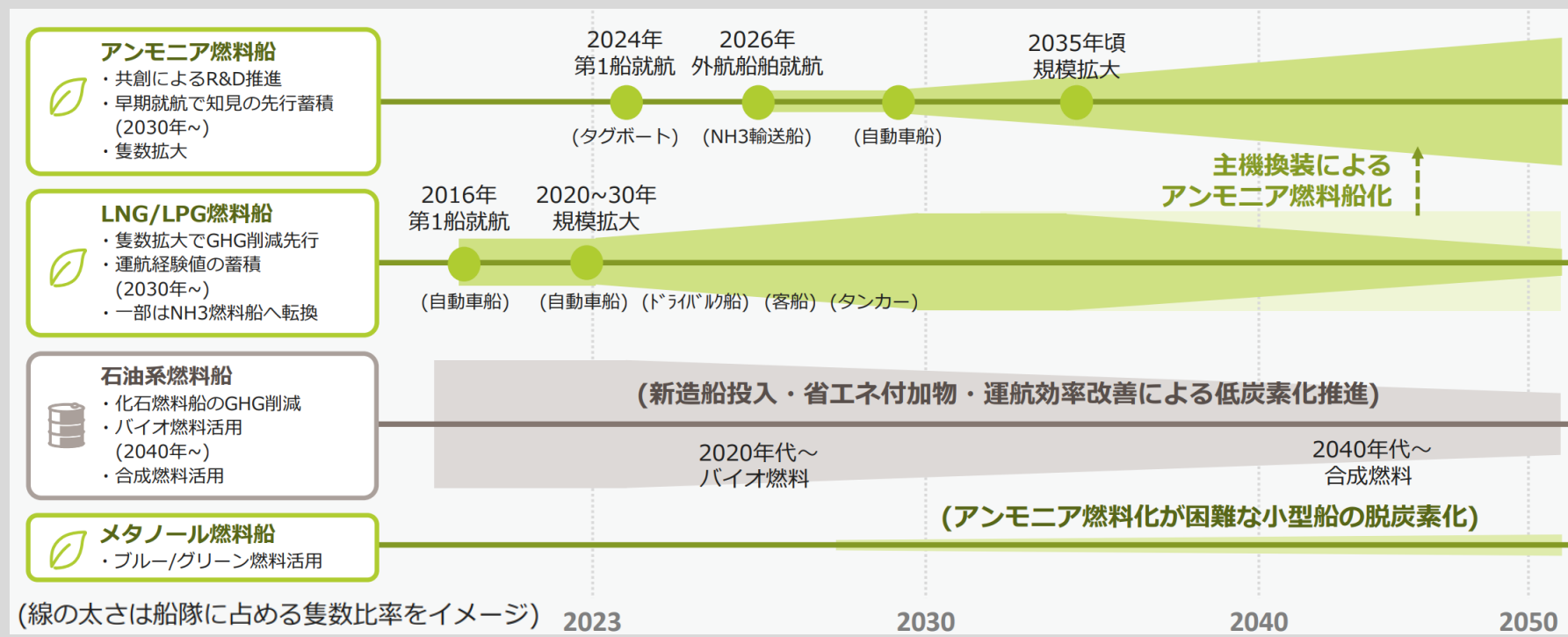
1. 緒言
 - 1.1. 環境先進企業としてのNYKグループを目指して
 - 1.2. 運航における主機関故障と環境(≒安全)性能
 - 1.3. 他業界に学ぶ状態診断の最新技術動向
 - 1.4. 定量的な機関状態診断手法構築に向けて
 - 1.5. MTIでの船用機関シミュレーション開発
2. 船用主機関シミュレーションモデルの開発
3. 機関故障の解析と実験
4. 故障箇所推定手法の構築
5. 結言

環境先進企業としてのNYKグループを目指して

MEPC80:2050年頃までのGHG排出ネットゼロが目標 → NYK:EX(Energy Transformation)が経営戦略の一軸

EX - 船舶燃料転換シナリオ*

船舶脱炭素化へ4,500億円の投資 → GHG削減において**船用主機関**は大幅な変革期



燃料転換

→ 新技術の利活用

既存燃料

→ 主機関の最適化

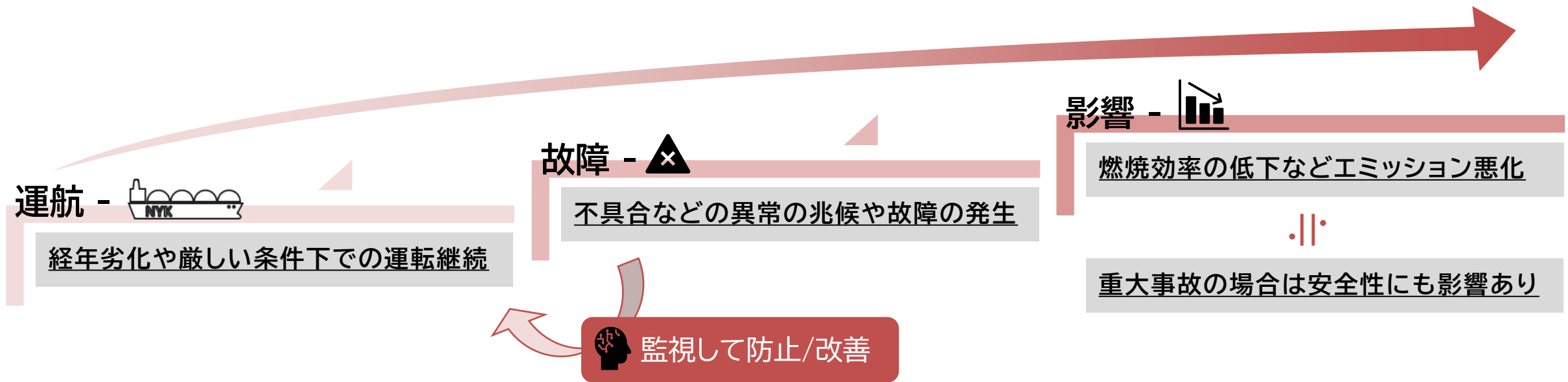
広範な条件で性能確保



エミッション監視

→ 重要なKPIに

運航における主機関故障と環境(≒安全)性能



NYKの基本ポリシー「Bringing Value To Life」 = 顧客にも地球にも優しい海上輸送

➔ 主機関の環境(≒安全)性能の向上：適切に運用しベストコンディションで動作することが必要

✓ 定量的な状態診断による主機異常の早期発見で安全 = エミッション増加の防止と改善を保証



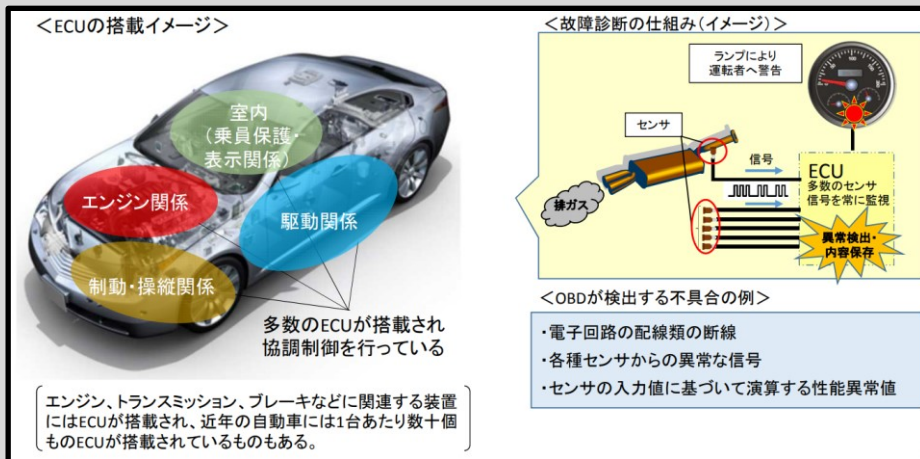
他業界に学ぶ状態診断の最新技術動向

自動車業界では2017年より欧州で実走行での排気性能評価(RDE)が導入され実稼働状態でのエミッションの厳しい規制

OBD(On-Board Diagnostics)

: 厳しい環境規制クリアのための計測/制御技術

対象の故障を特定しエミッションを一定以下に維持

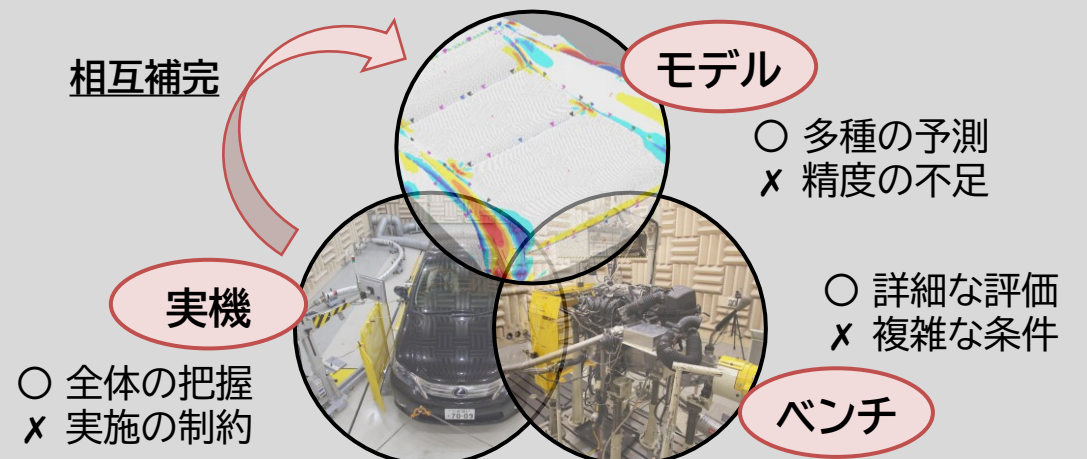


*画像引用) 国土交通省, 車載式故障診断装置(OBD)に関する制度と運用の現状
<https://www.mlit.go.jp/common/001213453.pdf>

MBD(Model Based Engineering)

: シミュレーションを活用したエンジンの最適化

適合や評価の精度向上、開発検証プロセス加速



*画像引用) トヨタ紡織, 試験・評価の技術, <https://www.toyota-boshoku.com/jp/development/evaluation/facility/>

トヨタ自動車との技術交流会や技術コンサルティングを通じた技術開発を実施

定量的な機関状態診断手法構築に向けて

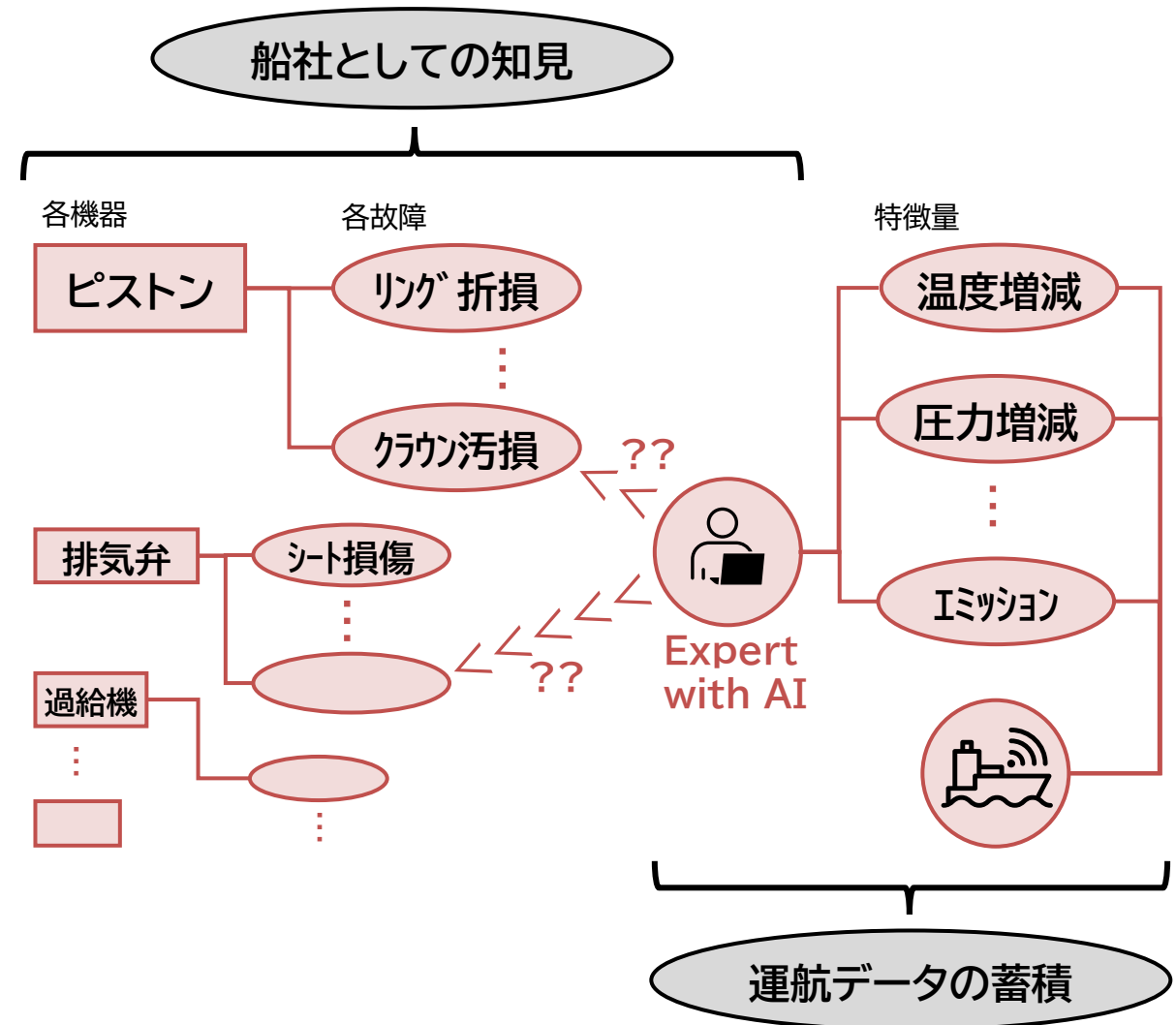
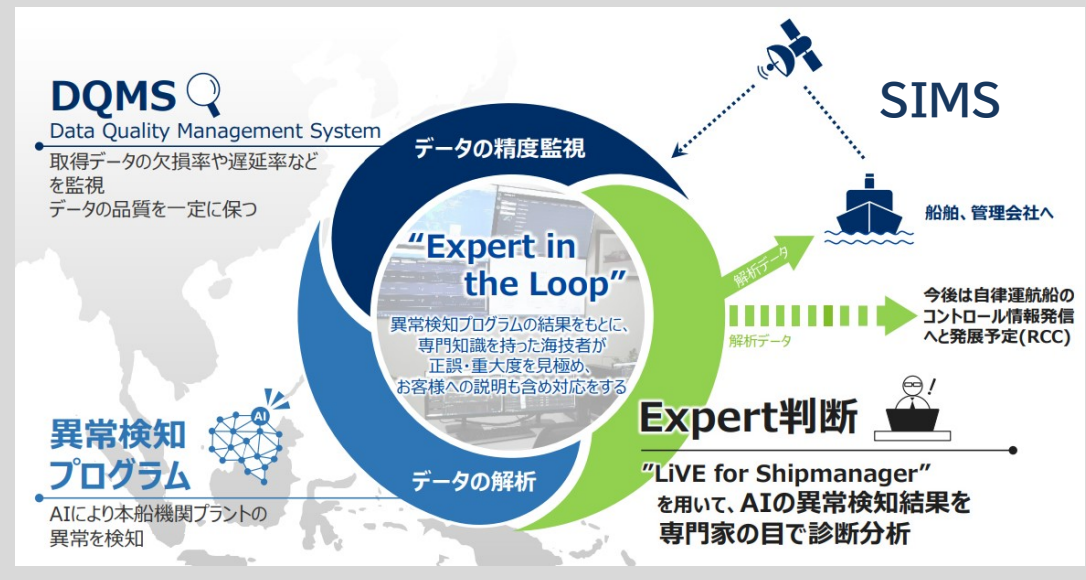
As-Is



運航データを取得&蓄積してAIと専門家の目で状態診断
 → 船社知見のExpert in the Loopで一定レベルに到達
 詳細な理論的裏付けや新技術への適用などが次ステップ

RDC – Remote Diagnostic Center

従来からのNYKにおける安全・環境への取り組み例*



定量的な機関状態診断手法構築に向けて

As-Is



運航データを取得&蓄積してAIと専門家の目で状態診断
 → 船社知見のExpert in the Loopで一定レベルに到達
詳細な理論的裏付けや新技術への適用などが次ステップ

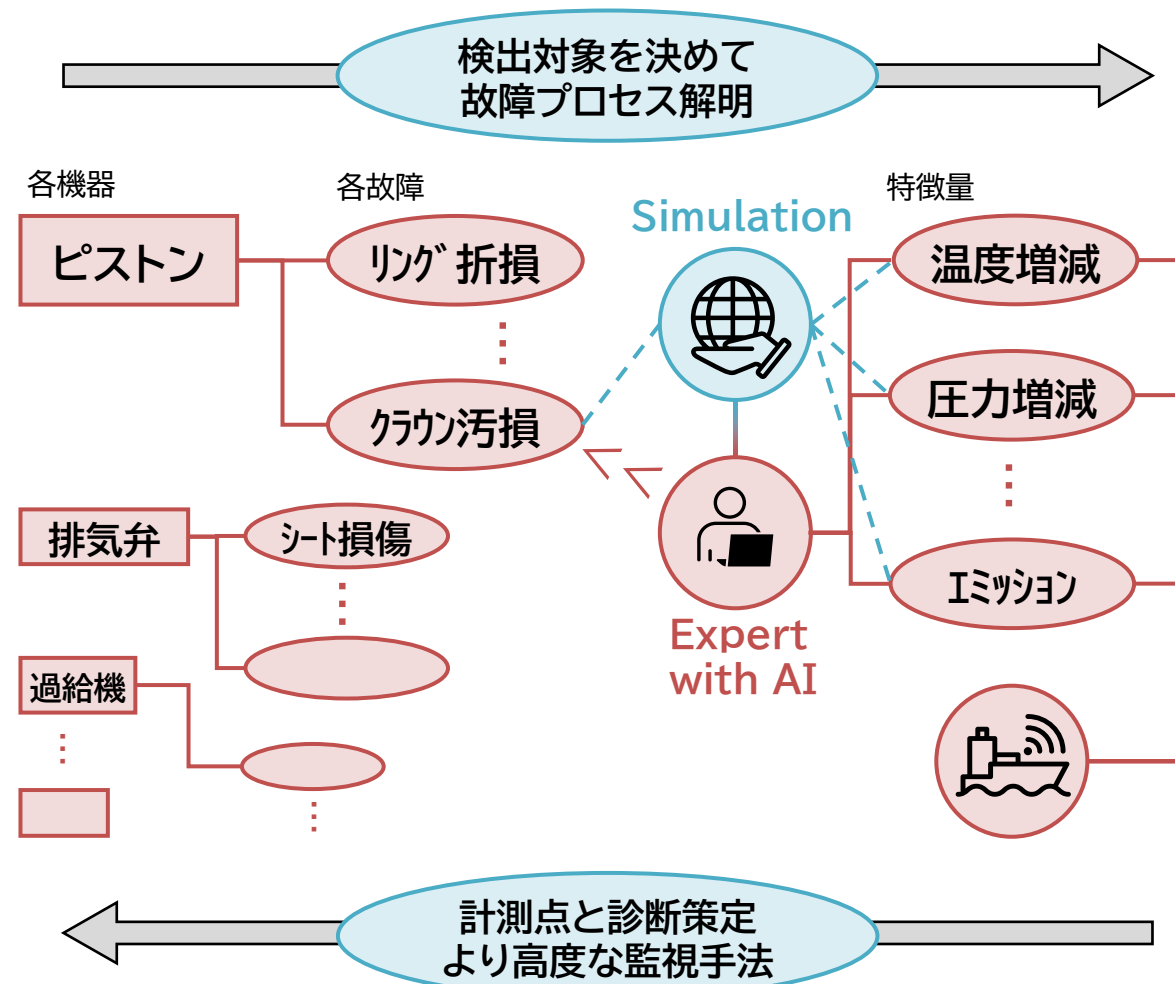
シミュレーションモデル



To-Be



机上のシミュレーションで”やってみて検証”が実現可能に
 → 状態診断アイデアの仮説検証、プロセスの詳細考察
定量的かつ詳細な主機状態把握(エミッション保証)を可能に

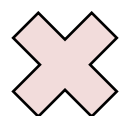


MTIでの船用主機関シミュレーション開発

トヨタ自動車のシミュレーションやOBD(On-Board Diagnostics)技術を船用業界にも適用する
 ➔ 検出対象を決め故障プロセスと診断手法を策定し、健全な状態で設計通りに船用主機関を運用する



- エンジン最適化設計のためのシミュレーション技術
- OBD規制に対応するための計測および制御技術



- 海運会社としてエンジンを使いこなすヒト/知見/現場
- オペレーション面でのノウハウ蓄積によるビッグデータ



*画像引用) トヨタ自動車, https://toyota-career.snar.jp/jobboard/detail.aspx?id=NUvXAqhmDUvZW_yJpKhXSQ

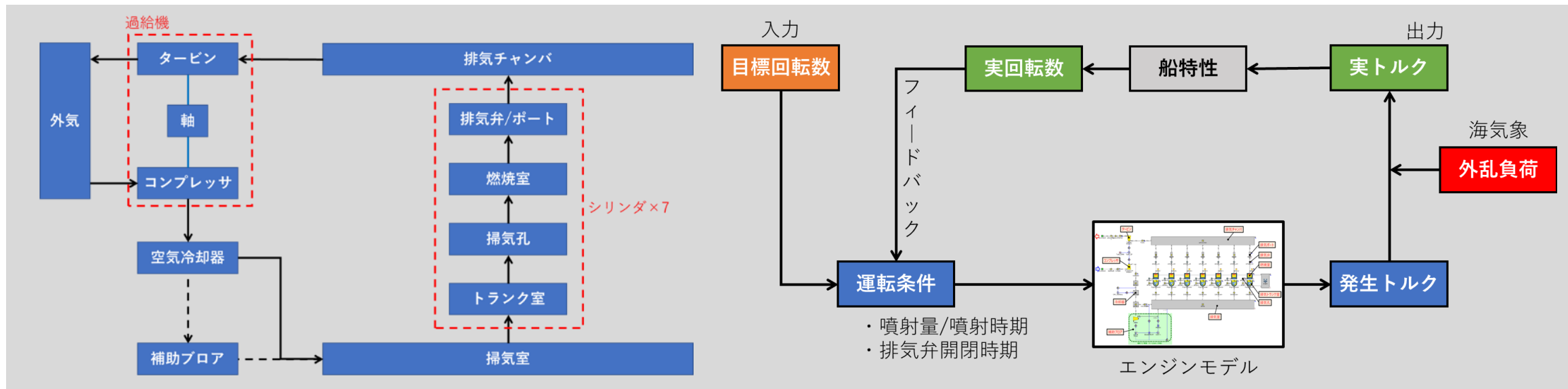
トヨタ自動車の協力のもと船用機関シミュレーションを開発
 ➔ 状態診断手法を構築し主機状態把握(=エミッション保証)を目指す

目次

1. 緒言
2. 船用主機関シミュレーションモデルの開発
 - 2.1. シミュレーションモデルの概要
 - 2.2. シミュレーションモデルの構築
 - 2.3. シミュレーションモデルの制御適合
 - 2.4. シミュレーションモデルの性能評価
3. 機関故障の解析と実験
4. 故障箇所推定手法の構築
5. 結言

シミュレーションモデルの概要

モデル概要 -能代丸(7UEC60LSE-Eco-A2)-



シミュレーション開発の流れ

STEP1 モデル構築

図面から設計情報を取得。モデルを仮定しコンピューター上で作成することでエンジンを模擬する。

STEP2 制御適合

主機の運転(制御)情報を反映することで計算が可能に。実行し(精度は問わない)計算結果が得られる。

STEP3 精度確認

出荷時/実海域オペレーションデータなど実際に合わせ込みを実施。モデルの正確性をあげていく。

パラメータスタディ

シミュレーションで様々な試行を実施。本来見えないデータや繰り返し計算で結果を考察。

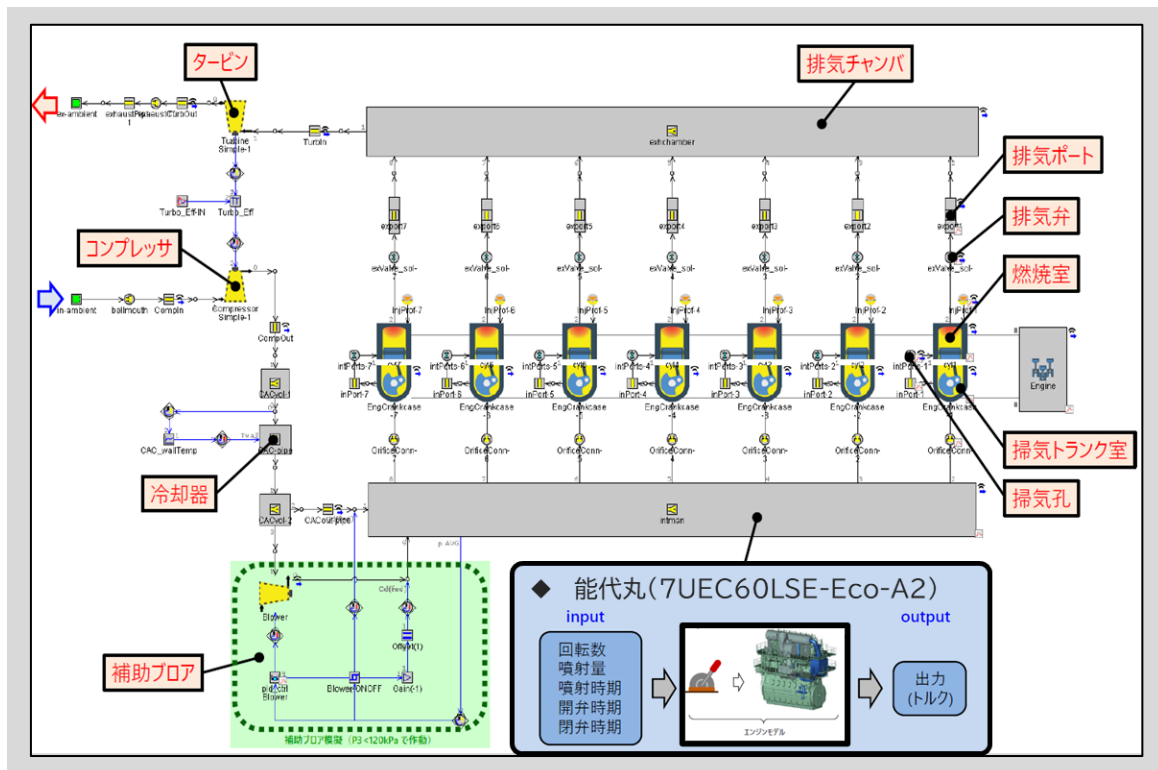
モデルの修正(同定)

故障診断手法開発へ!

シミュレーションモデルの構築

主機関の設計情報をもとに各部品をモデル化しエンジンプラントを再現
 ✓ トヨタのシミュレーションノウハウを活用し1Dシミュレーターを構築

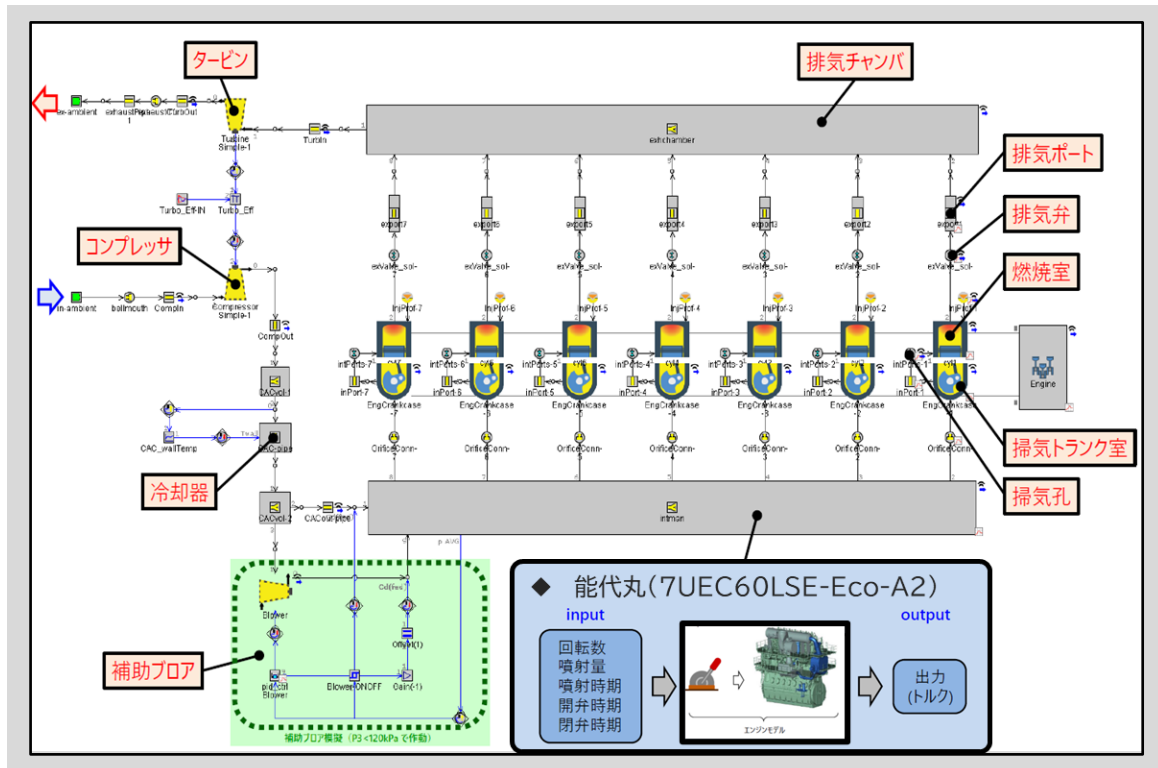
主機関シミュレーションモデル



シミュレーションモデルの構築

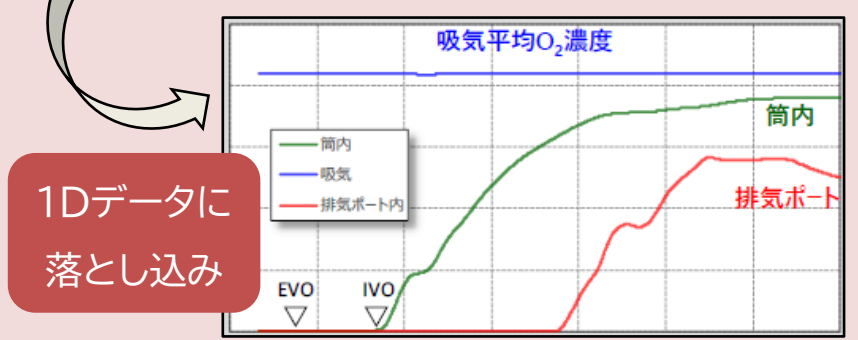
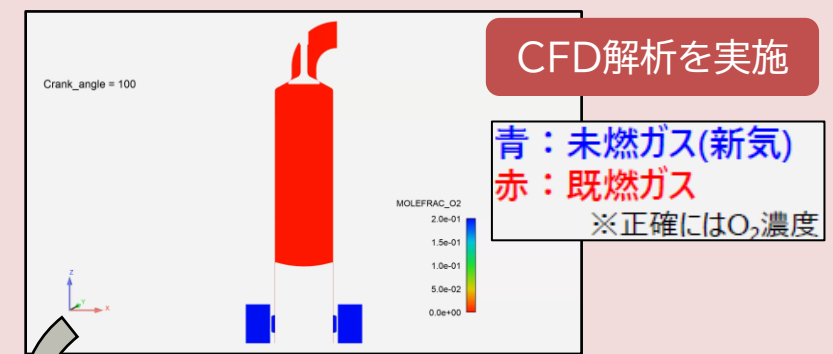
主機関の設計情報をもとに**各部品をモデル化**しエンジンプラントを再現
 ✓ **トヨタのシミュレーションノウハウを活用**し1Dシミュレーターを構築

主機関シミュレーションモデル



トヨタ解析ノウハウの活用

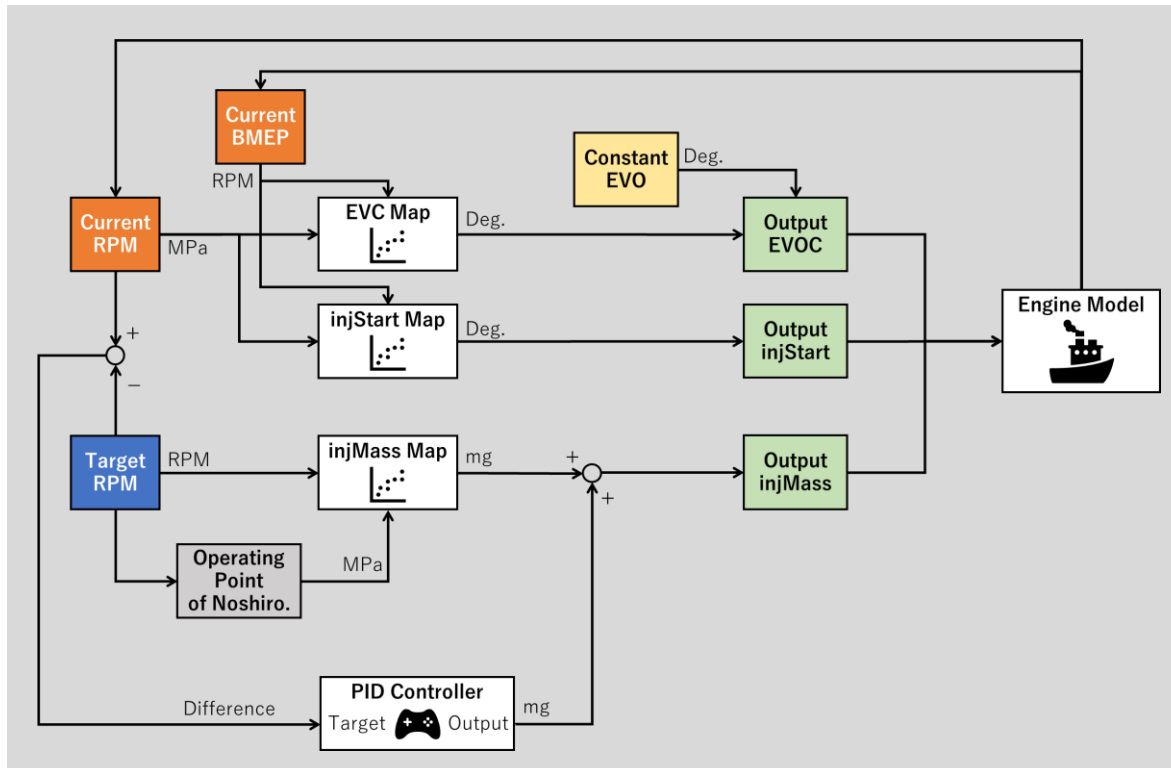
- ◆ 自動車のエンジンシミュレーションに使用される**GT-Power**によりモデルを構築
- ◆ 船用主機関特有の現象についても**トヨタ自動車**の技術やノウハウを活用し再現



シミュレーションモデルの制御適合

文献や図面、オペレーションプロファイルより**運転(制御)情報**を推定
 ✓ 机上で任意の検証を実施し**エンジン挙動を考察**できるモデルを構築

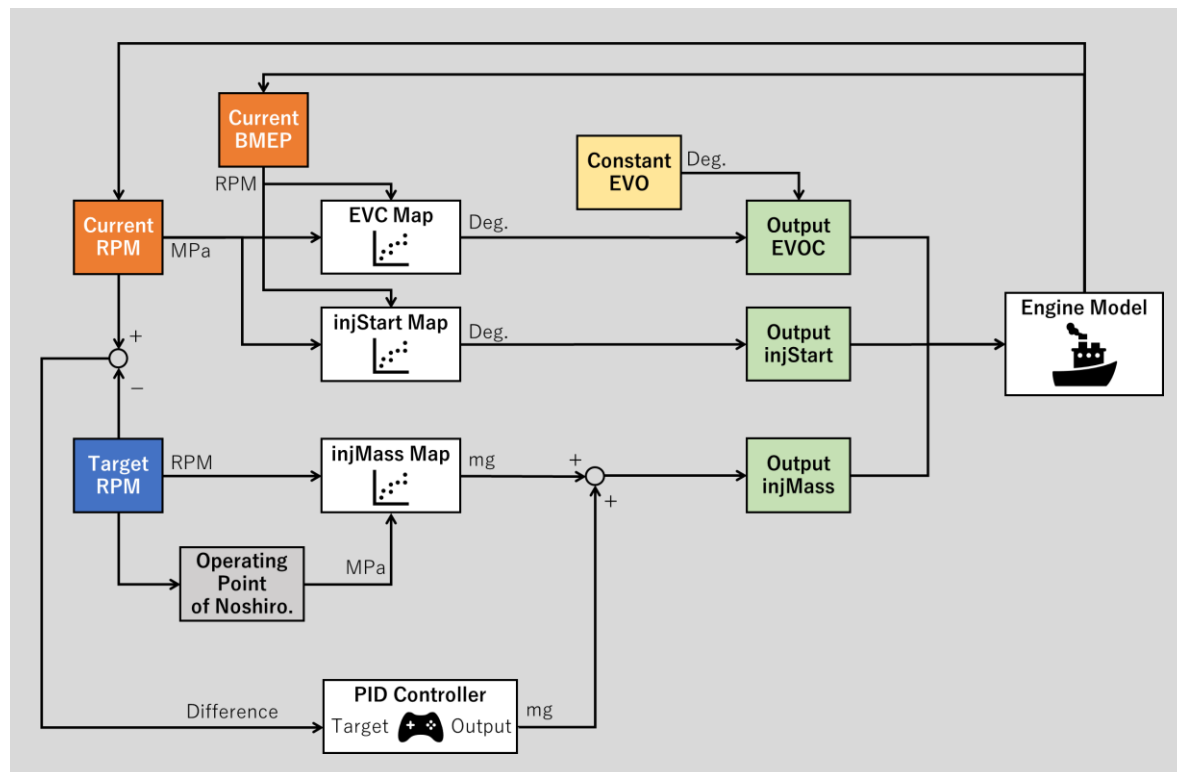
ECU(Engine Control Unit)



シミュレーションモデルの制御適合

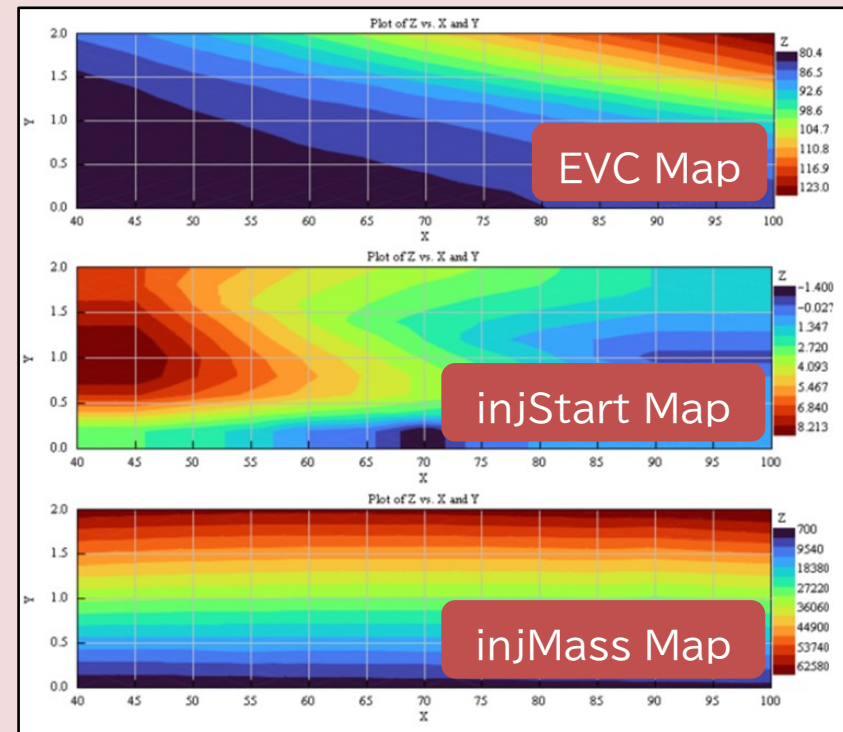
文献や図面、オペレーションプロファイルより**運転(制御)情報**を推定
 ✓ 机上で任意の検証を実施し**エンジン挙動を考察**できるモデルを構築

ECU(Engine Control Unit)



エンジン制御則の適合

- ◆ エンジンの運転からブロック図を推定、動作目的に応じた**制御則を構築可能**
- ◆ 排弁閉じタイミング、噴射期間、噴射量の最適条件を推測、**エンジンの制御適合を実施**

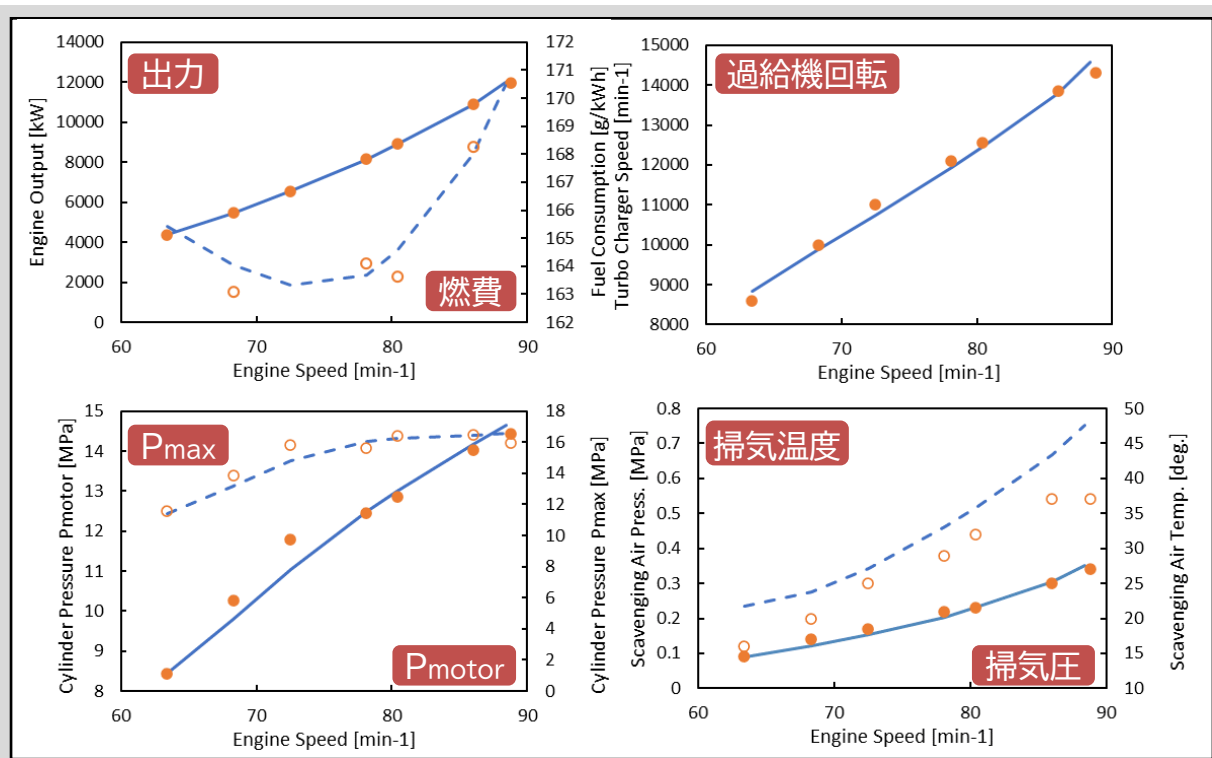


シミュレーションモデルの性能評価

完成図書(エンジン出荷データ)に一致するように**モデル改修**を実施

✓ **作成**→**計算**→**比較**→**修正のプロセス**を繰り返し実機に合わせ込み

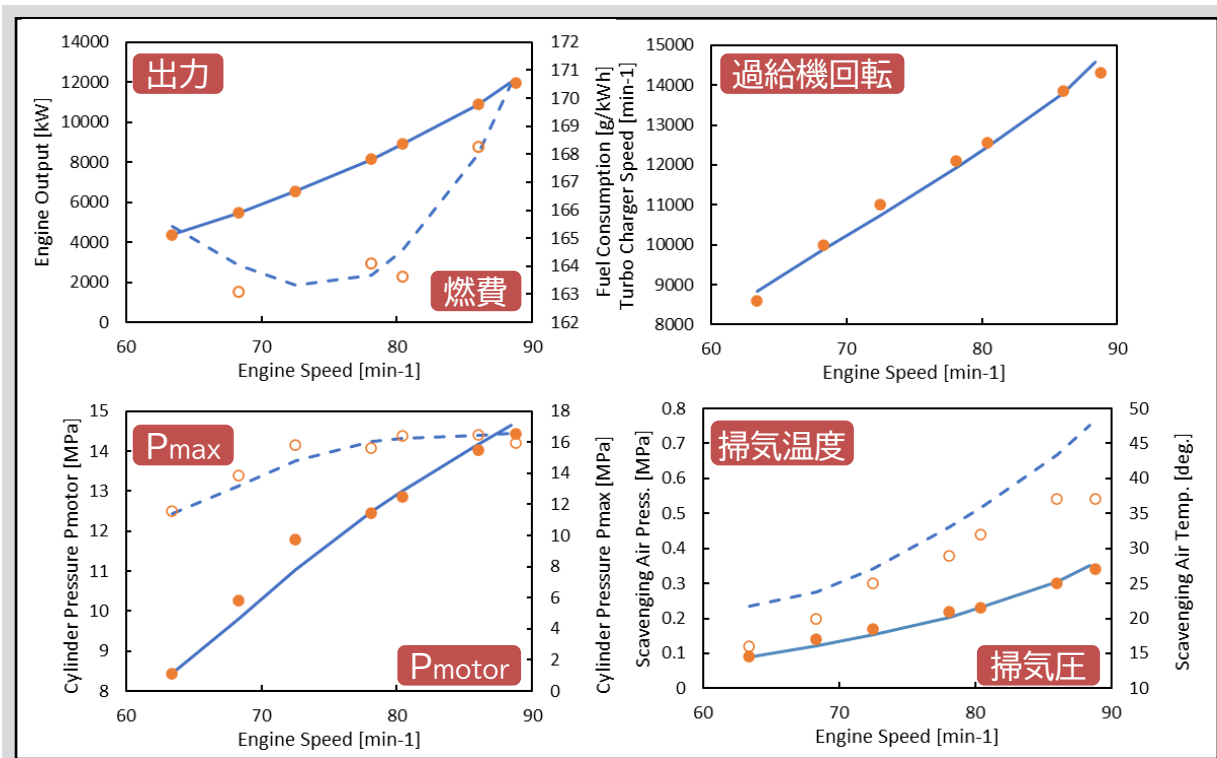
解析結果(点:実機、線:解析結果)



シミュレーションモデルの性能評価

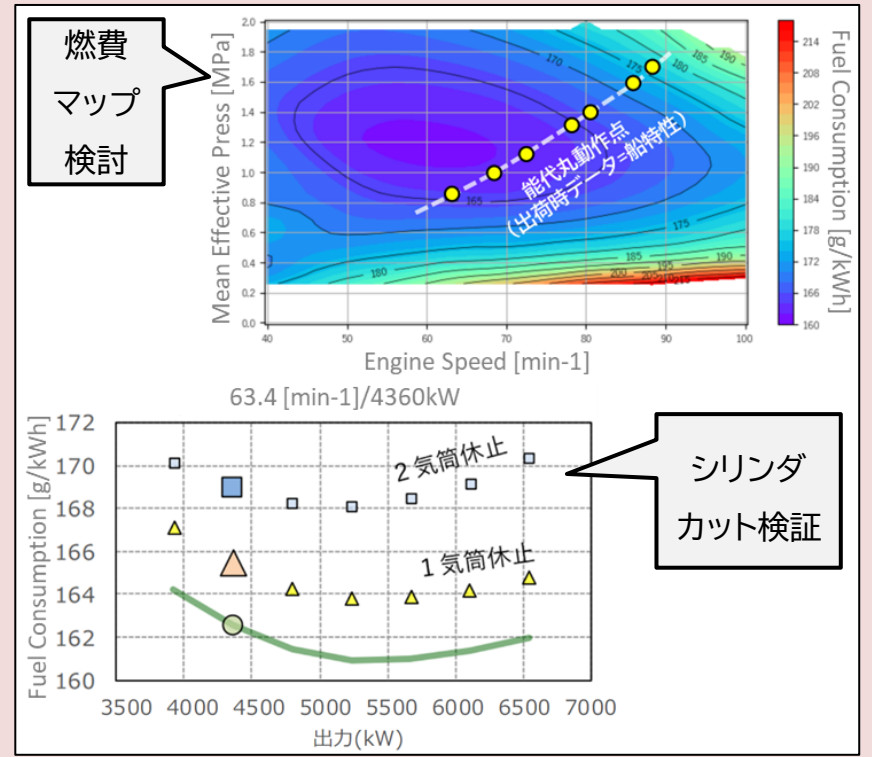
完成図書(エンジン出荷データ)に一致するように**モデル改修**を実施
 ✓ **作成**→**計算**→**比較**→**修正のプロセス**を繰り返し実機に合わせ込み

解析結果(点:実機、線:解析結果)



パラメータスタディ例

- ◆ 各種運転条件を変更して、**燃費マップ**の作成など最適制御条件の探索ができる
- ◆ 実航海(海象気象など)の影響を考慮した解析や**オペレーション方針検証**が可能に



目次

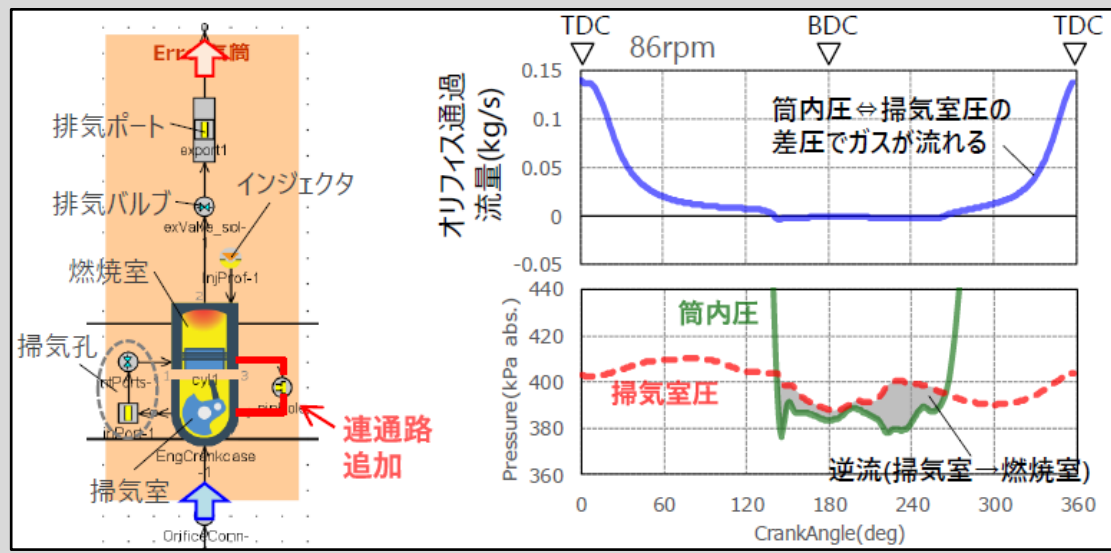
1. 緒言
2. 船用主機関シミュレーションモデルの開発
3. 機関故障の解析と実験
 - 3.1. 不具合模擬による故障時挙動の分析
(ピストンリング折損と燃料噴射弁の噴孔拡大)
 - 3.2. 試験機関による故障時挙動の検証
4. 故障箇所推定手法の構築
5. 結言

不具合模擬による故障時挙動の分析①

不具合模擬の実施例①：ピストンリングの折損(ブローバイ発生)
 ✓ リングからのガス抜けをシリンダ→掃気室の連通路で再現

計算の仮定(仮定の連通路)

ピストンリング折損時はリングのシール性が低下しガス抜けが発生が予想されるため、連通路を仮定して再現する

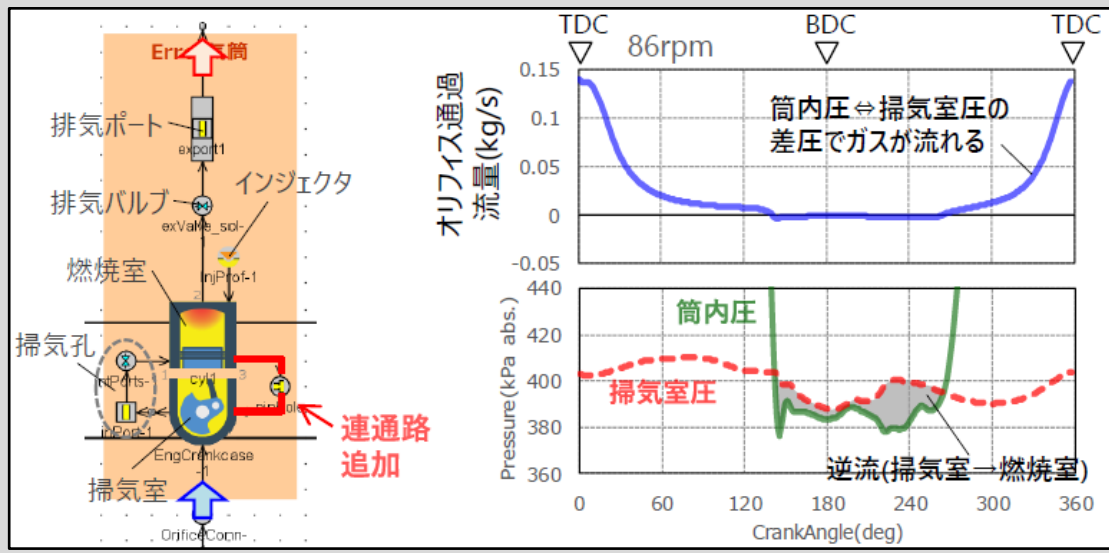


不具合模擬による故障時挙動の分析①

不具合模擬の実施例①：ピストンリングの折損(ブローバイ発生)
 ✓ リングからのガス抜けをシリンダ→掃気室の連通路で再現

計算の仮定(仮定の連通路)

ピストンリング折損時はリングのシール性が低下しガス抜けが発生が予想されるため、連通路を仮定して再現する



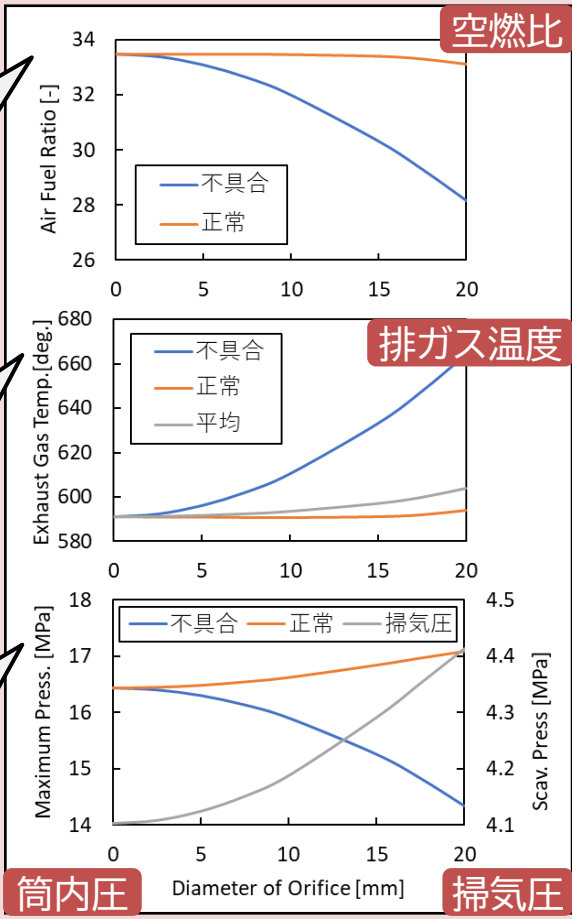
解析結果

◆ 不具合気筒で「燃焼室→掃気室」へ漏れ量が増加

① 不具合シリンダの
燃焼ガス戻りに伴う
➔ A/F(空燃比)低下

② 不具合シリンダの
排気温度上昇に伴う
➔ 掃気圧増加

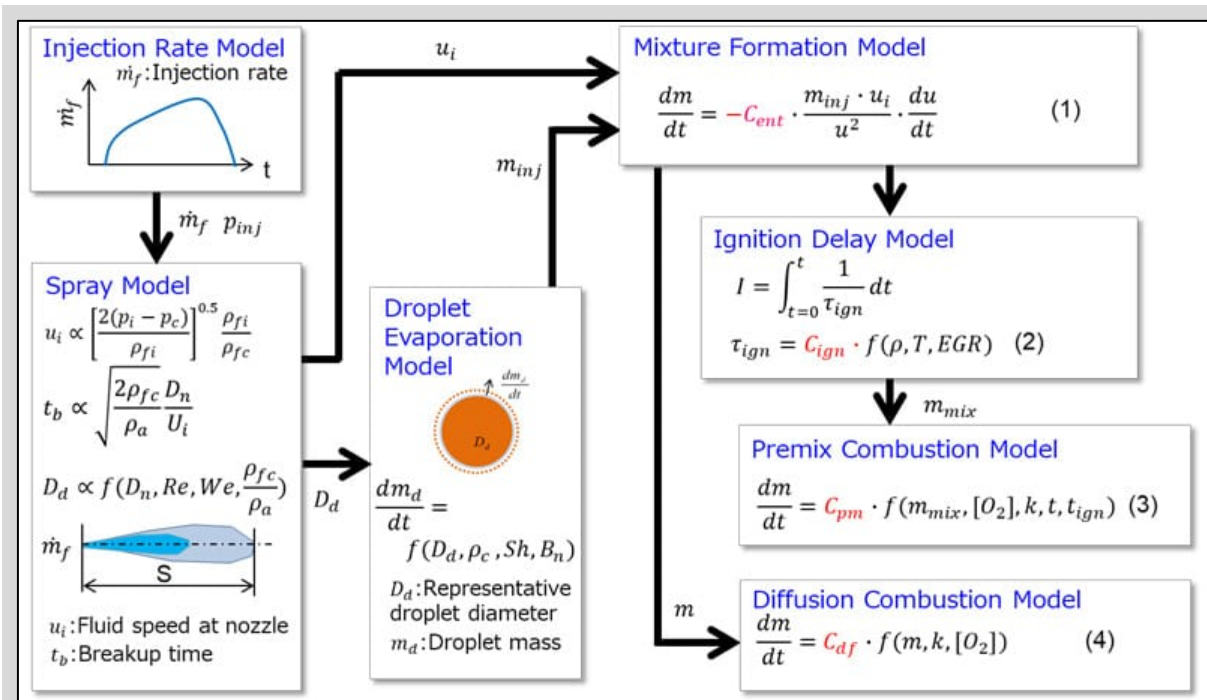
③ 正常シリンダの
燃焼効率改善に伴う
➔ Pmax上昇



不具合模擬による故障時挙動の分析②

不具合模擬の実施例②：燃料噴射弁の噴孔拡大(噴霧条件の悪化)
 ✓ 噴射量は同一として予測燃焼モデルのノズル噴孔を変更し再現

計算の仮定(DIPulseモデル)

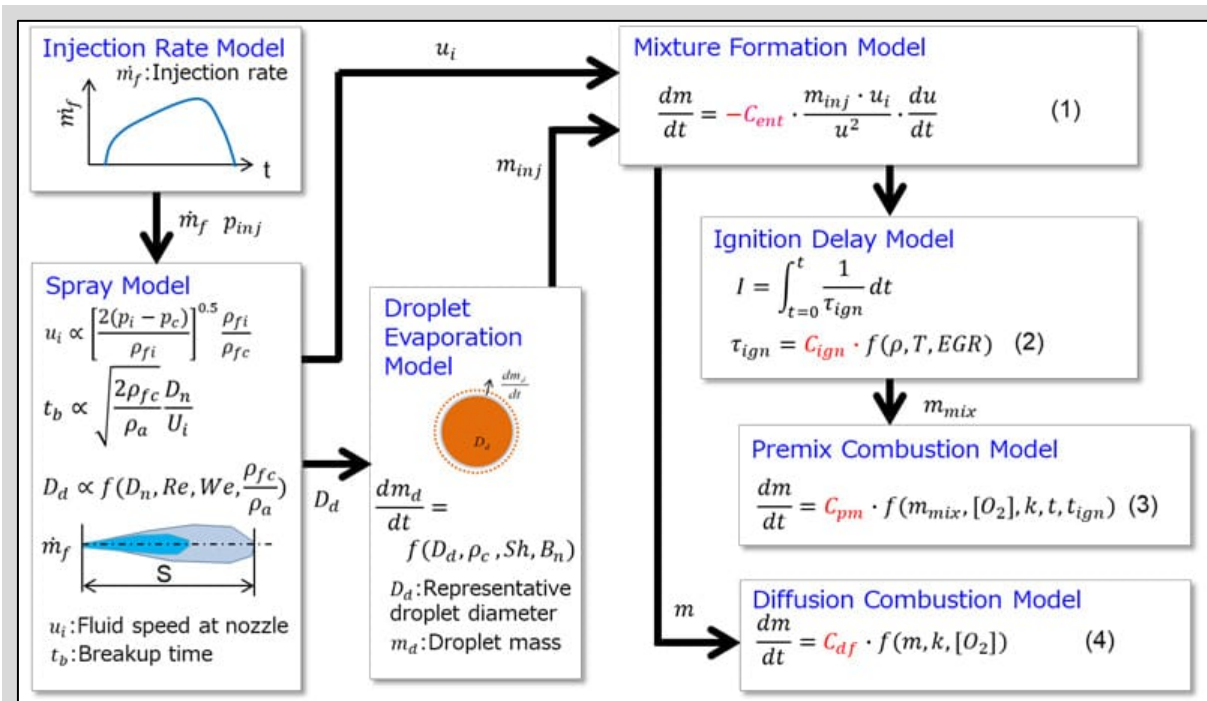


*引用)ヤンマーテクニカルレビュー, 現象論モデルを用いたディーゼル機関燃焼性能予測手法の構築,
https://www.yanmar.com/jp/about/technology/technical_review/2018/1101_6.html

不具合模擬による故障時挙動の分析②

不具合模擬の実施例②：燃料噴射弁の噴孔拡大(噴霧条件の悪化)
 ✓ 噴射量は同一として予測燃焼モデルのノズル噴孔を変更し再現

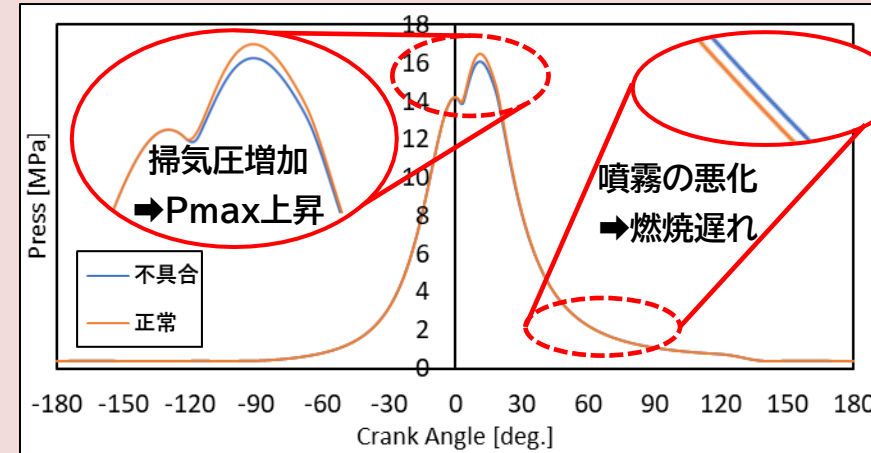
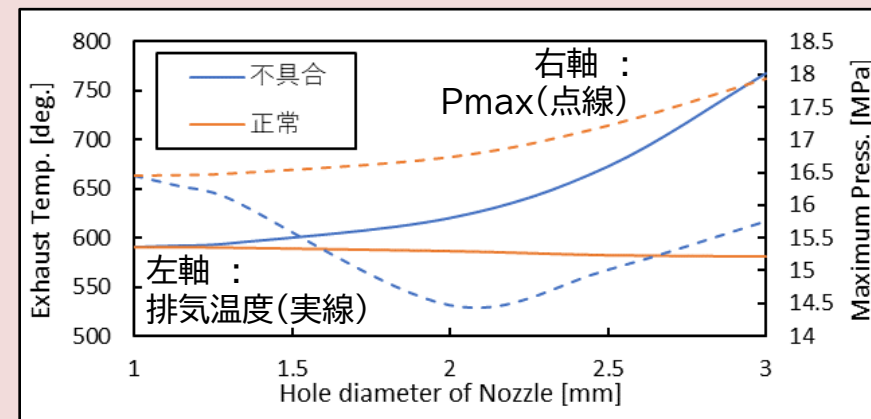
計算の仮定(DIPulseモデル)



*引用)ヤンマーテクニカルレビュー, 現象論モデルを用いたディーゼル機関燃焼性能予測手法の構築, https://www.yanmar.com/jp/about/technology/technical_review/2018/1101_6.html

解析結果

◆ リング折損の場合と同様に不具合気筒の排温上昇 → ... → 正常気筒のPmaxが上昇する



試験機関による故障時挙動の検証

試験機関で噴孔拡大した燃料噴射弁を取り付け**燃焼試験**を実施

✓ シミュレーション結果と比較し**挙動解析の妥当性**を検証

試験詳細(東京海洋大所有：3UEC33LSII-Eco)



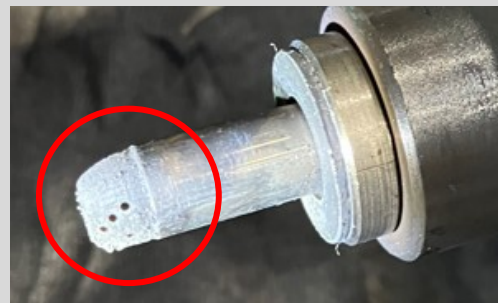
東京海洋大との共同研究

”燃料噴射弁不具合が主
機関に及ぼす影響解析“

➔ 実機試験を実施

CBMの4社共同研究*

噴孔を作為的に拡大した
燃料噴射弁ノズルを製作



*日本郵船、ディーゼル主機関におけるCBM実現
に向けた共同研究 [https://www.nyk.com/
news/2021/20210514_01.html](https://www.nyk.com/news/2021/20210514_01.html)

試験機関による故障時挙動の検証

試験機関で噴孔拡大した燃料噴射弁を取り付け**燃焼試験**を実施
 ✓ シミュレーション結果と比較し**挙動解析の妥当性**を検証

試験詳細(東京海洋大所有：3UEC33LSII-Eco)



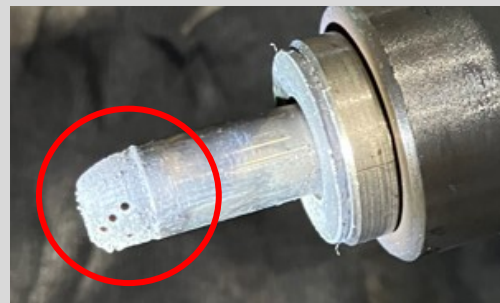
東京海洋大との共同研究

”燃料噴射弁不具合が主
機関に及ぼす影響解析“

➔ 実機試験を実施

CBMの4社共同研究*

噴孔を作為的に拡大した
燃料噴射弁ノズルを製作



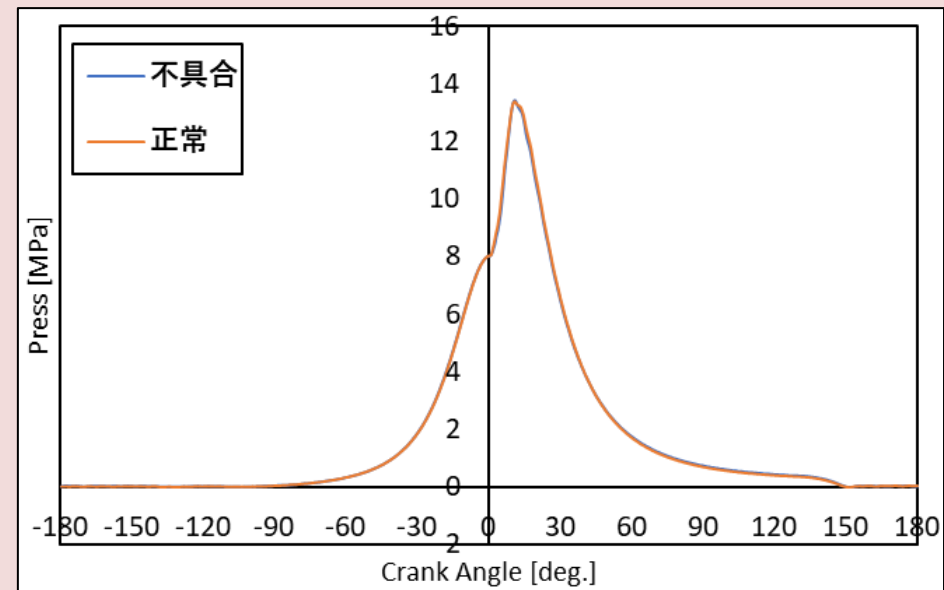
>>



*日本郵船，ディーゼル主機関におけるCBM実現に向けた共同研究 https://www.nyk.com/news/2021/20210514_01.html

試験結果

物理量	気筒	解析	実験
排気温度	正常	減少	減少
	不具合	増加	増加
掃気圧	—	増加	ほぼ変化なし
Pmax	正常	増加	微増
	不具合	減少	微増



試験機関による故障時挙動の検証

試験機関で噴孔拡大した燃料噴射弁を取り付け**燃焼試験**を実施
 ✓ シミュレーション結果と比較し**挙動解析の妥当性**を検証

試験詳細(東京海洋大所)



CBMの4社共同研究*
 噴孔を作為的に拡大し
 燃料噴射弁ノズルを製

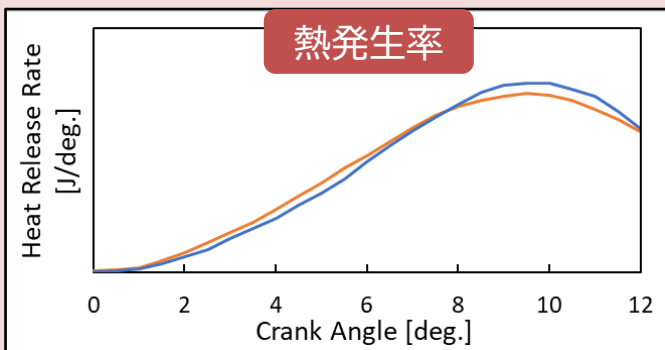


詳細考察

噴霧粒径が増大し燃焼が遅れる...

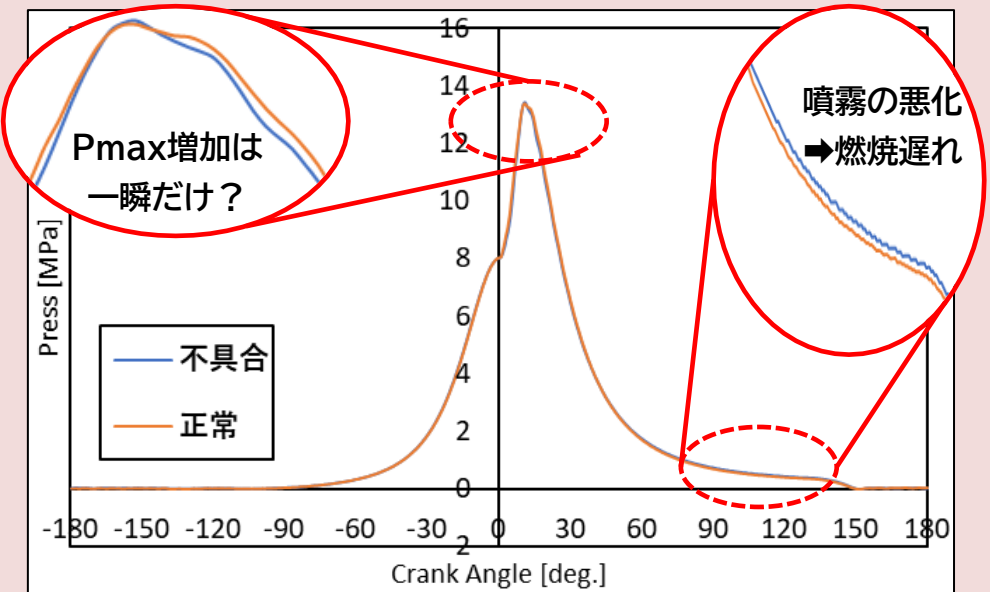
$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} V \frac{dp}{d\theta} + \frac{\kappa}{1 - \kappa} p \frac{dV}{d\theta}$$

質量燃焼割合	正常	不具合
MFB90-θign	16.5 deg.	17.0 deg.



試験結果

物理量	気筒	解析	実験
排気温度	正常	減少	減少
	不具合	増加	増加
掃気圧	—	増加	ほぼ変化なし
Pmax	正常	増加	微増
	不具合	減少	微増



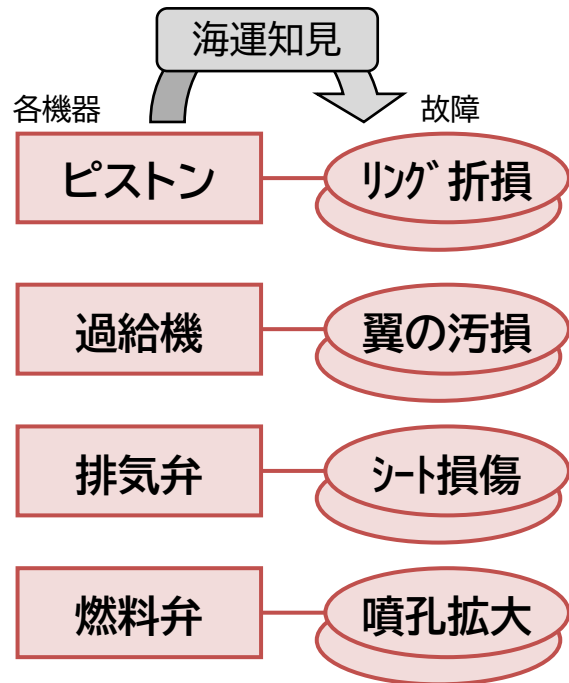
目次

1. 緒言
2. 船用主機関シミュレーションモデルの開発
3. 機関故障の解析と実験
4. 故障箇所推定手法の構築
 - 4.1. シミュレーションを活用した故障箇所推定
 - 4.2. 船社(運航者)の知見に基づく故障シナリオ分析
 - 4.3. パラメータ変化に基づく計測点の策定と故障診断
 - 4.4. 診断フローによる故障箇所推定手法の構築
5. 結言

シミュレーションを活用した故障箇所推定

シミュレーション活用

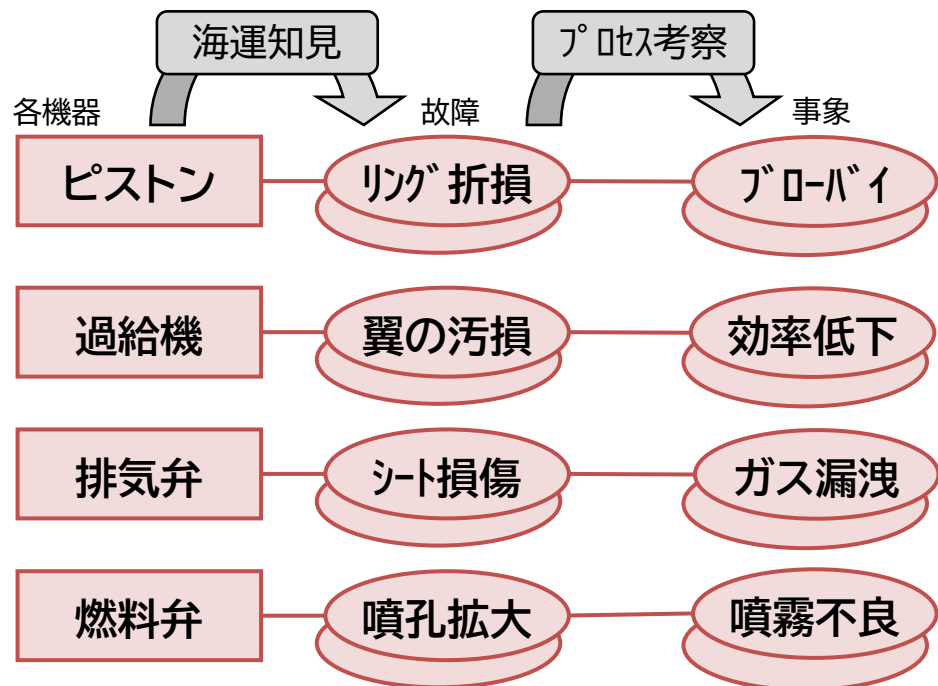
- ✓ 各機器に異常が起きた際の現象を再現、異常挙動を解析する
- ✓ 異常の結果起きるパラメータ変化を整理、本船で各値を計測
- ➔ パラメータの変化を追うことで異常の兆候や発生を特定！！



シミュレーションを活用した故障箇所推定

シミュレーション活用

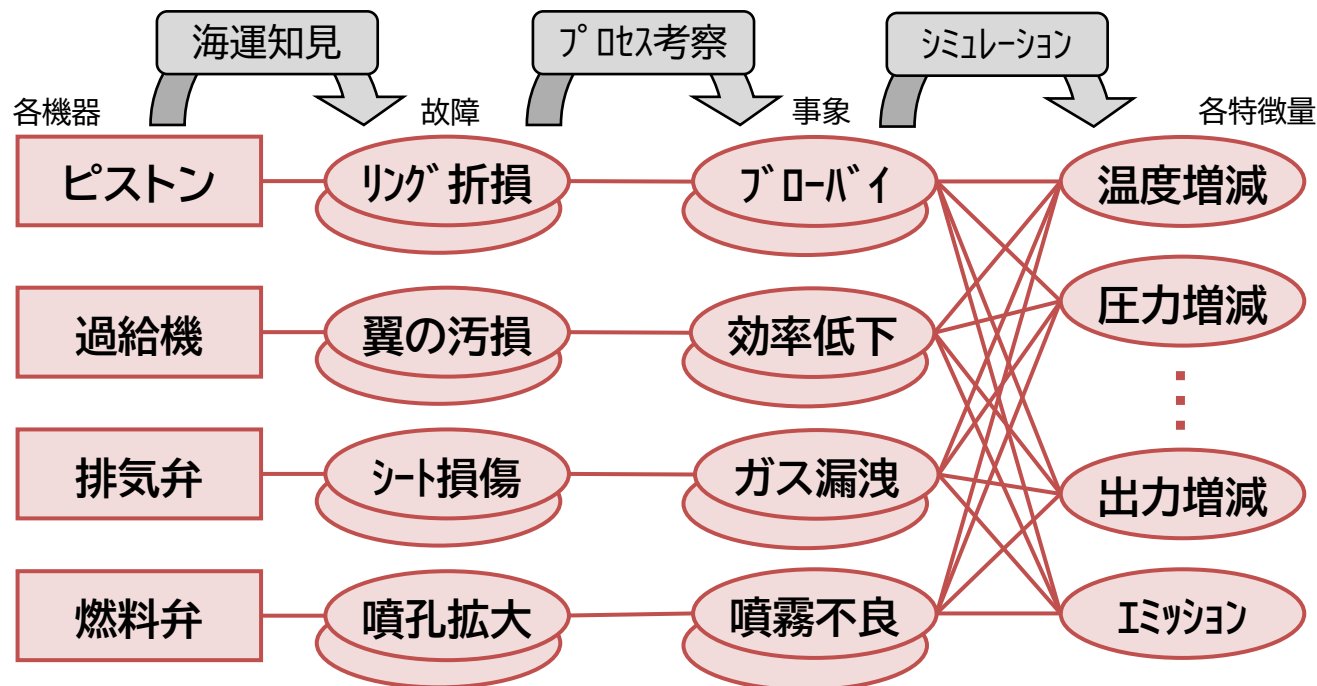
- ✓ 各機器に異常が起きた際の現象を再現、異常挙動を解析する
- ✓ 異常の結果起きるパラメータ変化を整理、本船で各値を計測
- ➔ パラメータの変化を追うことで異常の兆候や発生を特定！！



シミュレーションを活用した故障箇所推定

シミュレーション活用

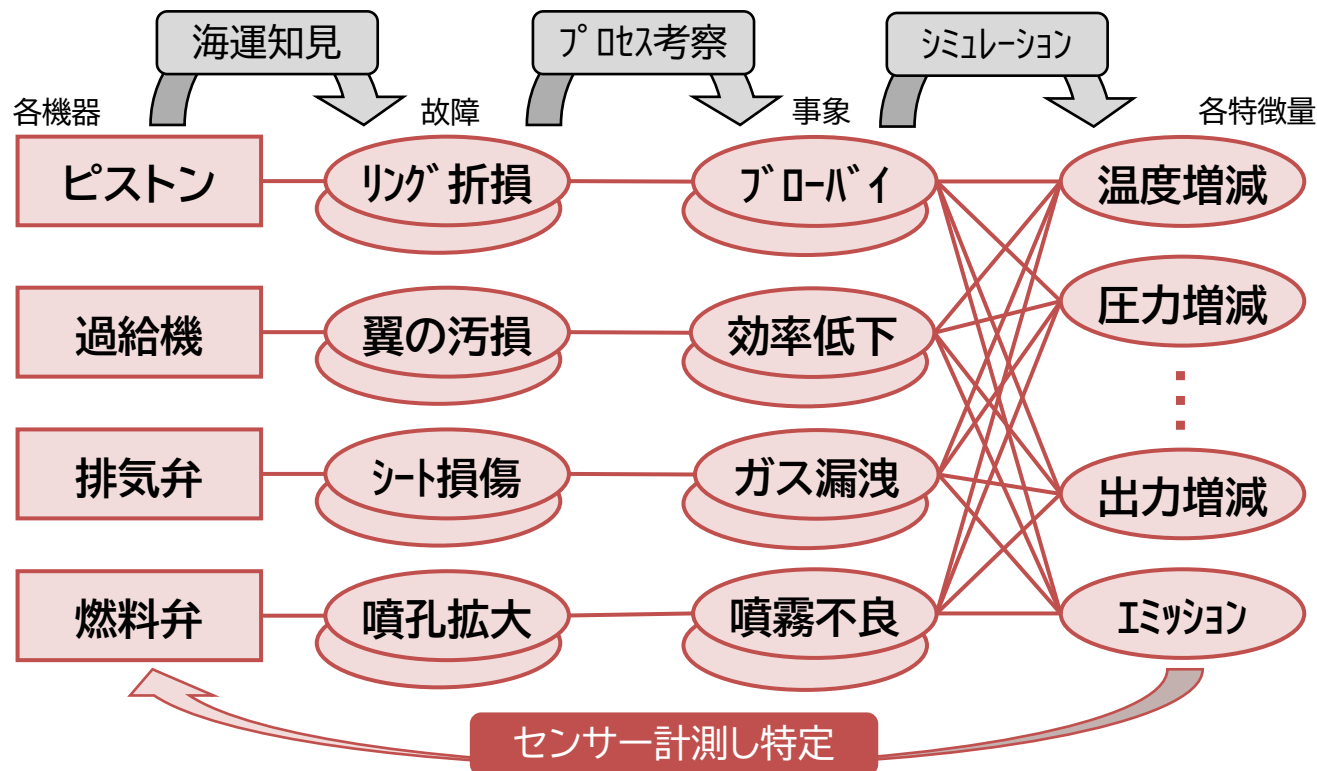
- ✓ 各機器に異常が起きた際の現象を再現、異常挙動を解析する
- ✓ 異常の結果起きるパラメータ変化を整理、本船で各値を計測
- ➔ パラメータの変化を追うことで異常の兆候や発生を特定！！



シミュレーションを活用した故障箇所推定

シミュレーション活用

- ✓ 各機器に異常が起きた際の現象を再現、異常挙動を解析する
- ✓ 異常の結果起きるパラメータ変化を整理、本船で各値を計測
- ➔ パラメータの変化を追うことで異常の兆候や発生を特定！！



船社(運航者)の知見に基づく故障シナリオ分析

運航者の知見

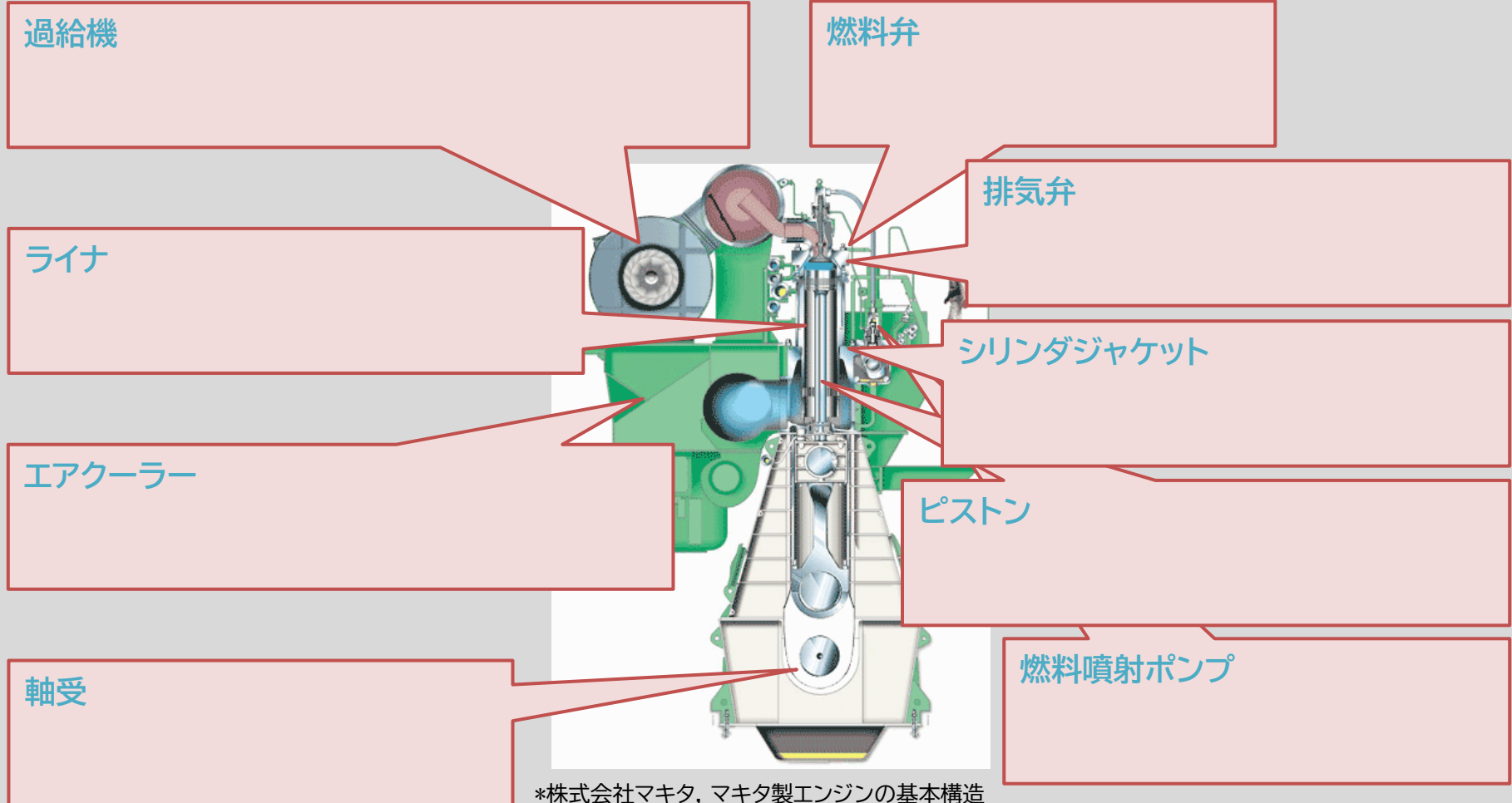
各機器における…

- ✓ 故障事例の列挙
- ✓ 故障の影響を分析

対象機器

- ・ 想定される故障
- ➔ 発生する事象

機器ごとの故障シナリオの分析



*株式会社マキタ, マキタ製エンジンの基本構造
<https://www.makita-corp.com/products/base/>

船社(運航者)の知見に基づく故障シナリオ分析

運航者の知見

各機器における…

- ✓ 故障事例の列挙
- ✓ 故障の影響を分析

対象機器

- ・ 想定される故障
- ➔ 発生する事象

故障シナリオを列挙



どのように診断する？

機器ごとの故障シナリオの分析

過給機

- ・ コンプレッサ/タービン/ディフューザーの汚損など
- ➔ 過給機効率の低下/掃気圧の減少

ライナ

- ・ ライナー表面摩耗/損傷など
- ➔ 掃気量減少/ガス漏洩/摩擦増加など

エアクーラー

- ・ 伝熱面汚損/冷却水流量低下/温度上昇など
- ➔ 掃気温度上昇/掃気圧力低下など

軸受

- ・ 潤滑不良/損傷など
- ➔ 摩擦増加/潤滑油温度上昇など

燃料弁

- ・ シート漏洩/噴孔拡大など
- ➔ 噴霧不良/未燃燃料増加など

排気弁

- ・ シート損傷/リフト低下など
- ➔ 機密不良/ガス漏洩/効率低下など

シリンダジャケット

- ・ 伝熱面汚損/流量低下/温度上昇など
- ➔ シリンダ内温度上昇など

ピストン

- ・ リング折損/クラウン汚損/冷却不良など
- ➔ ガス漏洩/ピストン外部温度上昇など

燃料噴射ポンプ

- ・ プランジャ摩耗/吐出弁漏洩など
- ➔ 噴射圧低下/噴射遅れなど

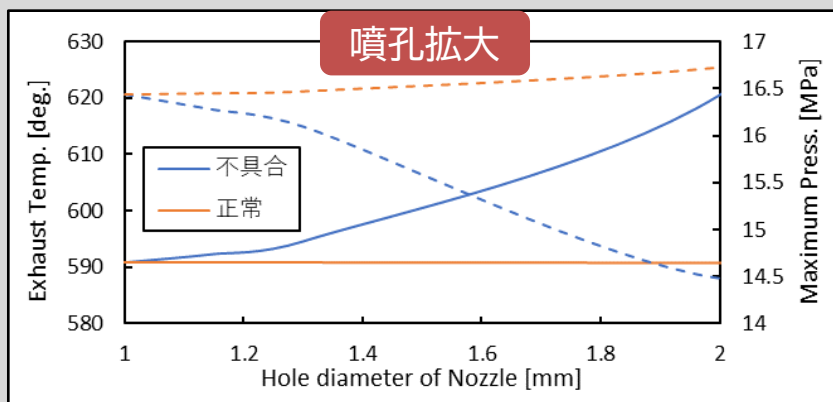
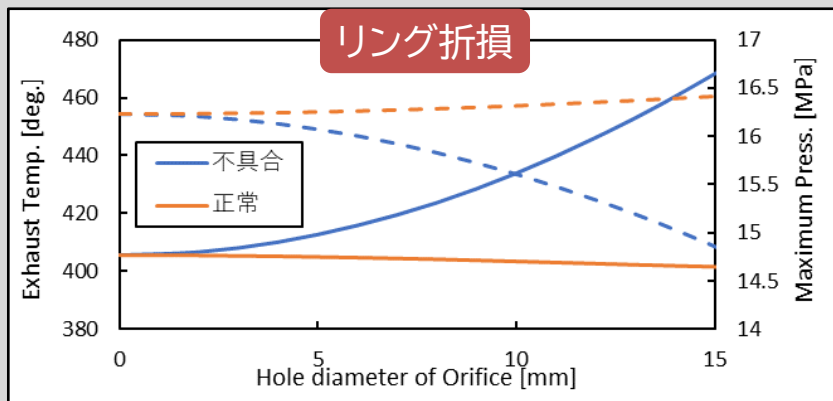
*株式会社マキタ, マキタ製エンジンの基本構造
<https://www.makita-corp.com/products/base/>

パラメータ変化に基づく計測点の策定と故障診断

故障診断(リング折損 vs 噴孔拡大)

同様のパラメータ変化のため故障の差別化困難

※ 左軸(実線:排気温度)/右軸(点線:Pmax)



計測点	正常	不具合
排気温度	減少	増加
掃気圧	増加	増加
Pmax	微増	減少

既知なので理由付けできるが...

実際の条件によって判断が難しい

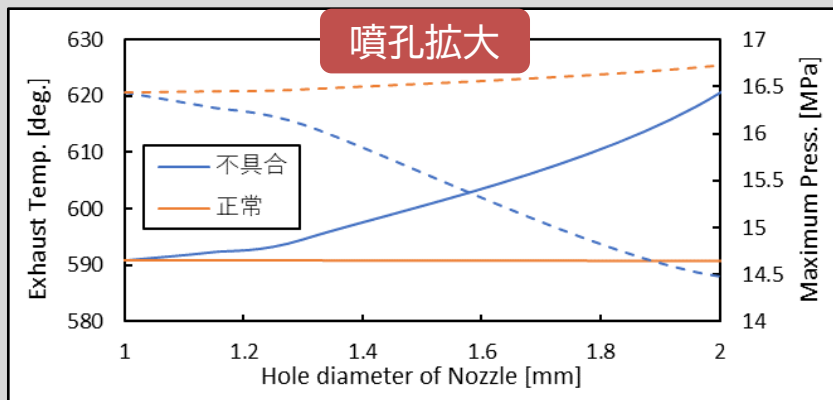
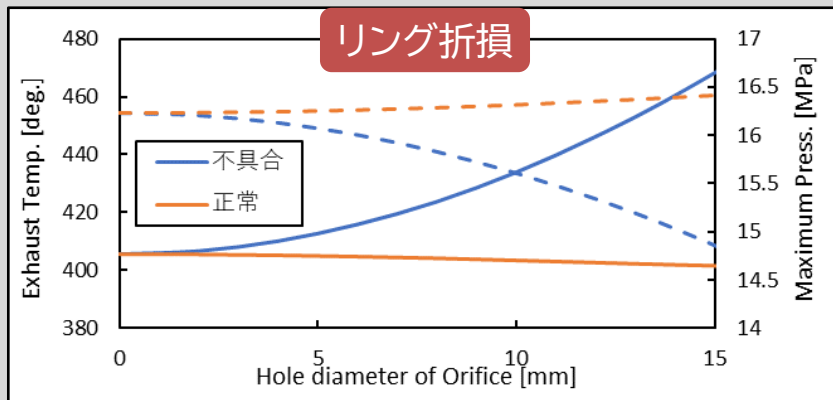
➔ 故障プロセスに基づく考察で
影響がより顕著な特徴量探索

パラメータ変化に基づく計測点の策定と故障診断

故障診断(リング折損 vs 噴孔拡大)

同様のパラメータ変化のため故障の差別化困難

※ 左軸(実線:排気温度)/右軸(点線:Pmax)



詳細プロセス考察

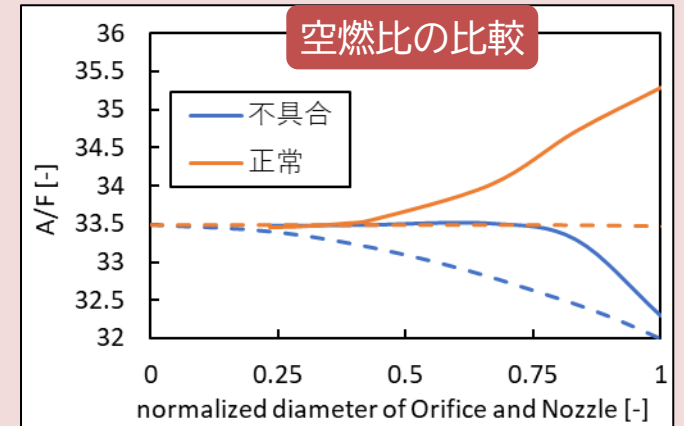
不具合気筒のA/F(空燃比)の変化は...

リング折損(点線):

➔ 吹き抜けのガス戻りのため低下

噴孔拡大(実線):

➔ 噴霧悪化だが投入量同じで変化少



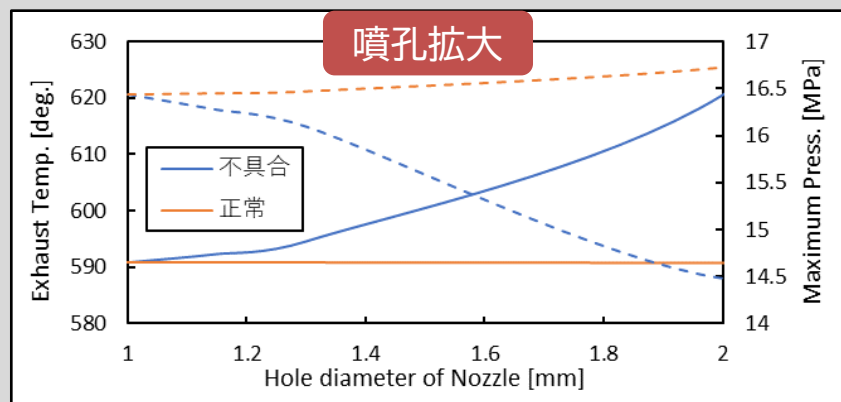
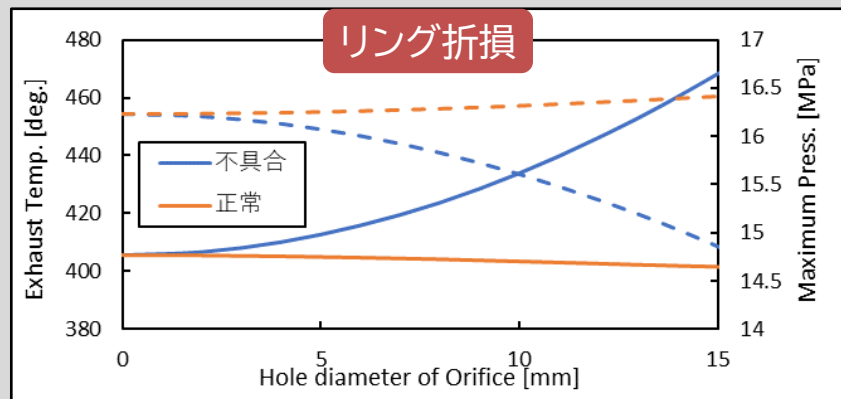
計測点	正常	不具合
排気温度	減少	増加
掃気圧	増加	増加
Pmax	微増	減少

パラメータ変化に基づく計測点の策定と故障診断

故障診断(リング折損 vs 噴孔拡大)

同様のパラメータ変化のため故障の差別化困難

※ 左軸(実線:排気温度)/右軸(点線:Pmax)



詳細プロセス考察

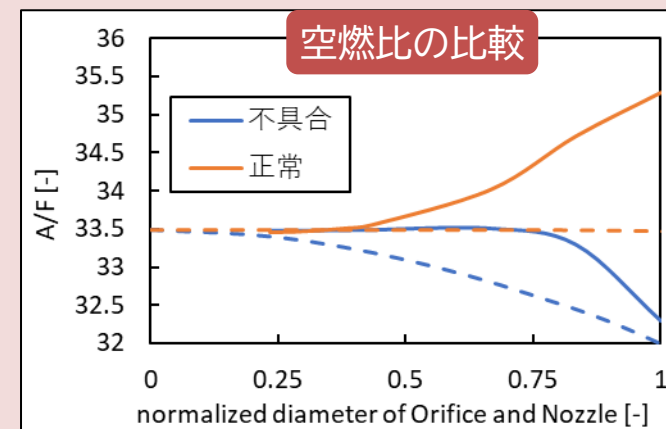
不具合気筒のA/F(空燃比)の変化は...

リング折損(点線):

➔ 吹き抜けのガス戻りのため低下

噴孔拡大(実線):

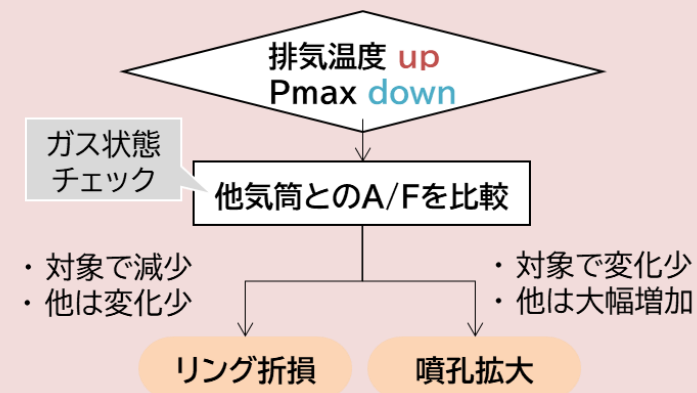
➔ 噴霧悪化だが投入量同じで変化少



計測点	正常	不具合
排気温度	減少	増加
掃気圧	増加	増加
Pmax	微増	減少



計測点の策定と故障診断

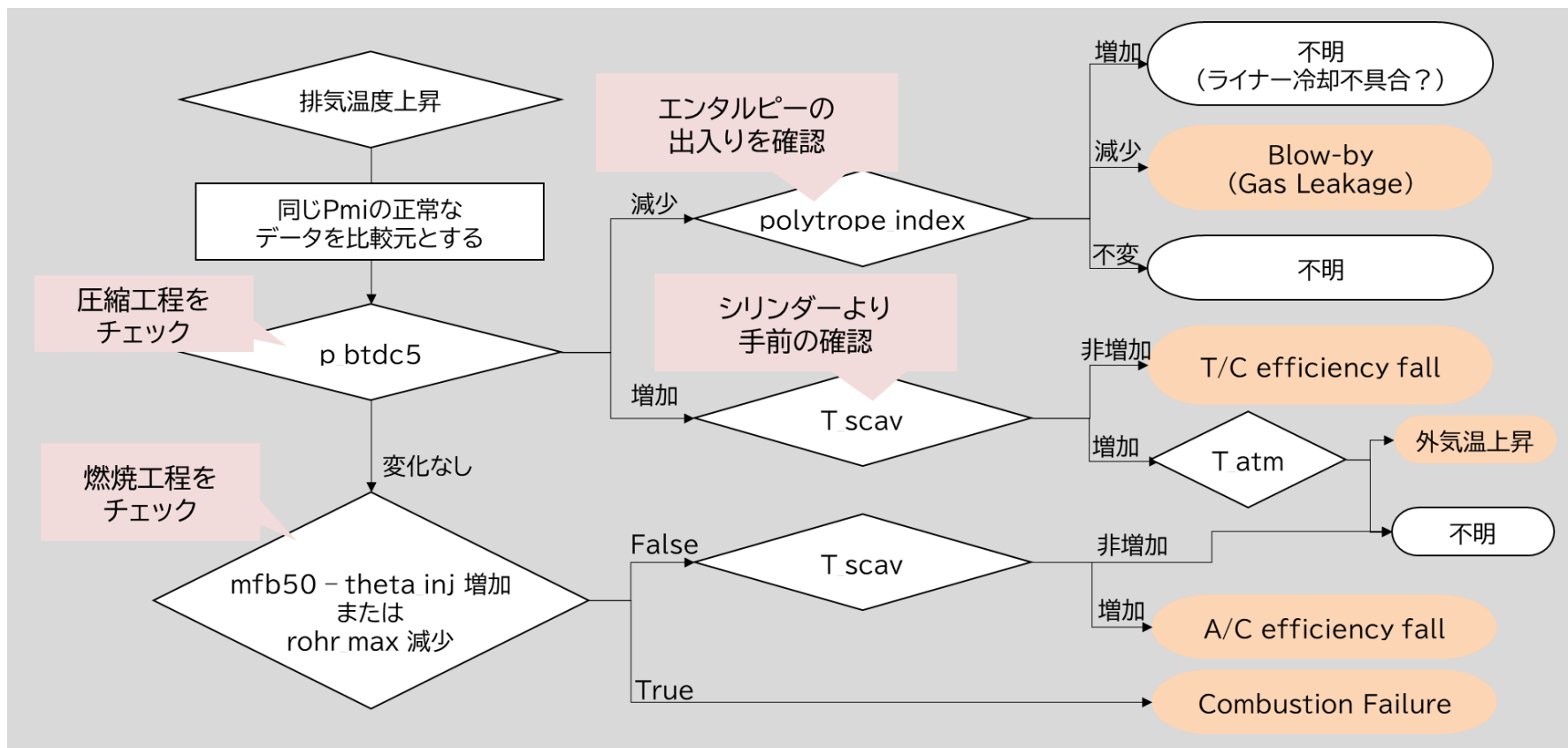


A/F計測の追加で故障診断が可能か

診断フローによる故障箇所推定手法の構築

各部品に**詳細プロセス**の考察を実施し診断フローに結合 ➡ 特徴量の変化による**故障箇所特定ロジック**構築

故障診断フローの検討(排温上昇時の例)



特徴量変化

現象の考察

機器の故障

診断フローによる故障箇所推定手法の構築

各故障シナリオを設定し影響解析を実施 ➡ パラメータスタディにより故障診断フローの検証や閾値の策定

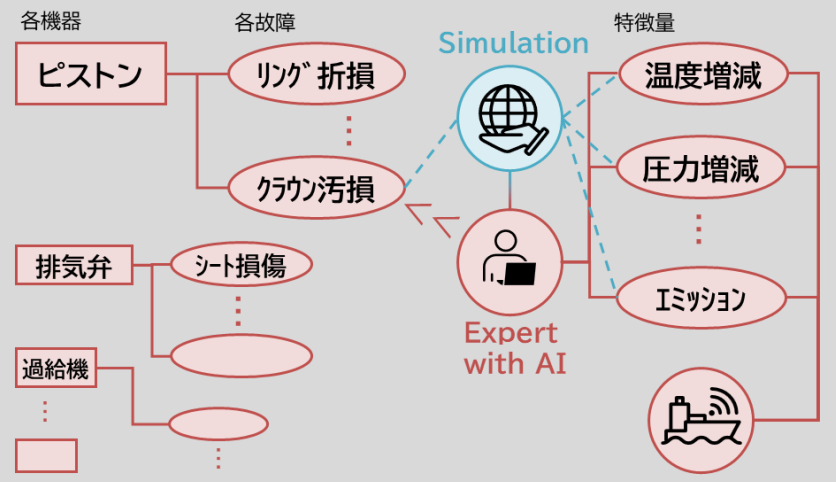
故障シナリオ	出力	掃気圧	該当シリンダ 排気温度	正常シリンダ 排気温度	該当シリンダ Pmax	SFOC
燃料弁噴射圧力低下	低下	低下	低下	若干増加	低下	増加
燃料弁噴射孔拡大	若干増加	増加	大幅増加	若干低下	増加	増加
排気弁リフト低下	若干低下	増加	大幅増加	若干低下	若干増加	増加
排気弁閉弁不良(ガス吹き抜け)	低下	増加	増加	若干増加	大幅低下	増加
ピストンリング折損(ブローバイ)	低下	増加	増加	若干増加	大幅低下	増加
故障シナリオ	出力	掃気圧	タービン入口 排ガス温度	タービン出口 排ガス温度	コンプレッサ出口 空気温度	SFOC
タービン効率低下	低下	低下	増加	大幅増加	低下	増加
コンプレッサ効率低下	低下	低下	増加	増加	若干増加	増加
故障シナリオ	出力	掃気圧	シリンダ出口 排ガス温度	Pmax	冷損	SFOC
空気冷却器汚損	低下	増加	増加	増加	増加	増加

目次

1. 緒言
2. 船用主機関シミュレーションモデルの開発
3. 機関故障の解析と実験
4. 故障箇所推定手法の構築
5. 結言
機関シミュレーションで切り拓く海事産業

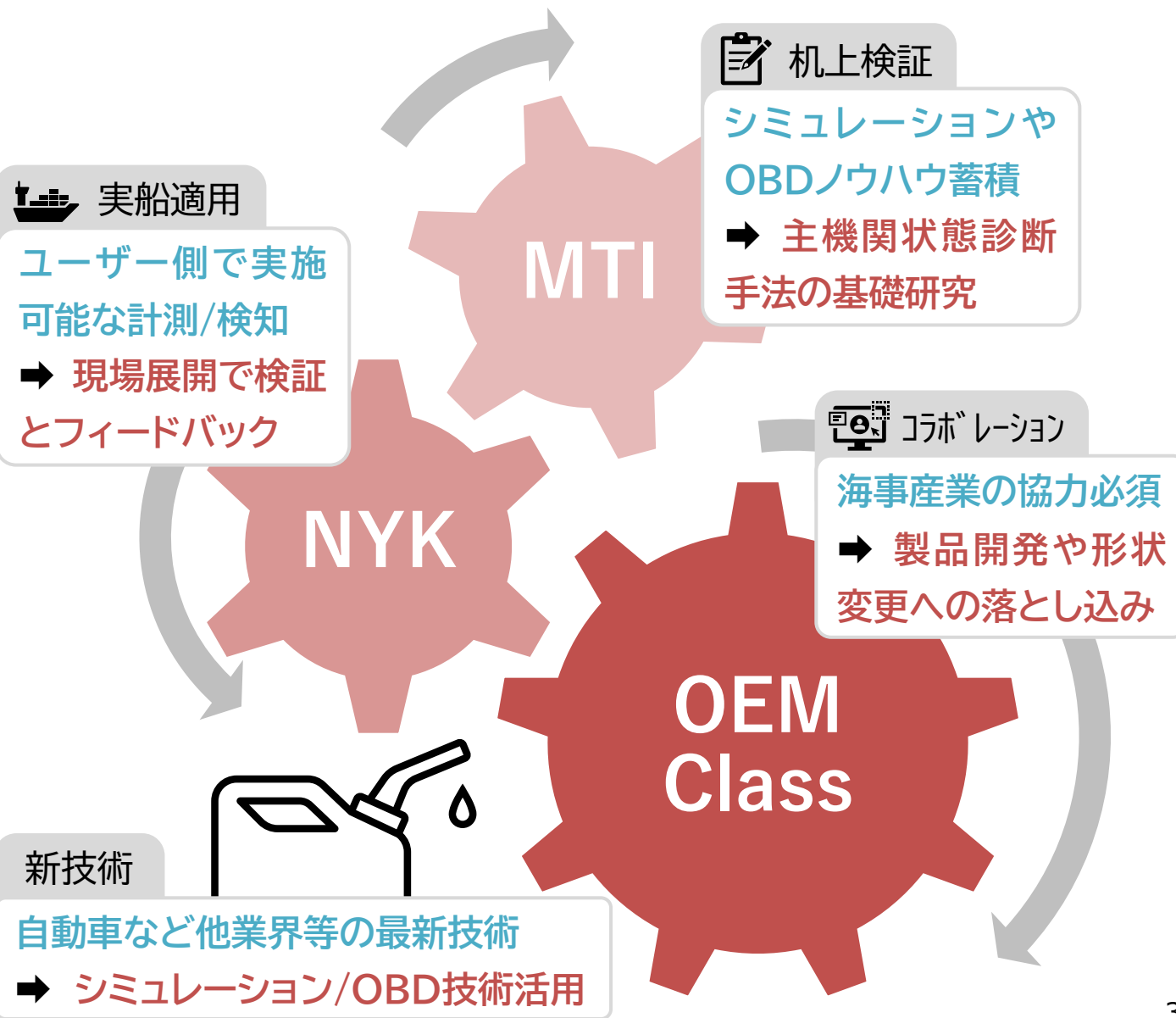
機関シミュレーションで切り拓く海事産業

定量的な主機状態診断手法構築



主機状態把握 (= エミッション管理)

- ① 事業部のオペレーションへ展開
 - ② 海事産業全体を巻き込んだ展開
+ α トヨタ等の新技術を活用する
- ➔ 新燃料等の未知システムへ適用も



ご清聴どうもありがとうございました。