

異常診断に向けた船用主機関シミュレーションの開発

- 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 -

正会員 ○小知井 秀馬* 渡部 潤* 井上 伸一*
小木曾 誠人** 吉村 裕史**

*株式会社MTI **トヨタ自動車株式会社

目次

1. 研究背景と目的
2. 主機シミュレーションモデルの開発と故障解析
3. 異常診断ロジックの構築
4. まとめと今後

目次

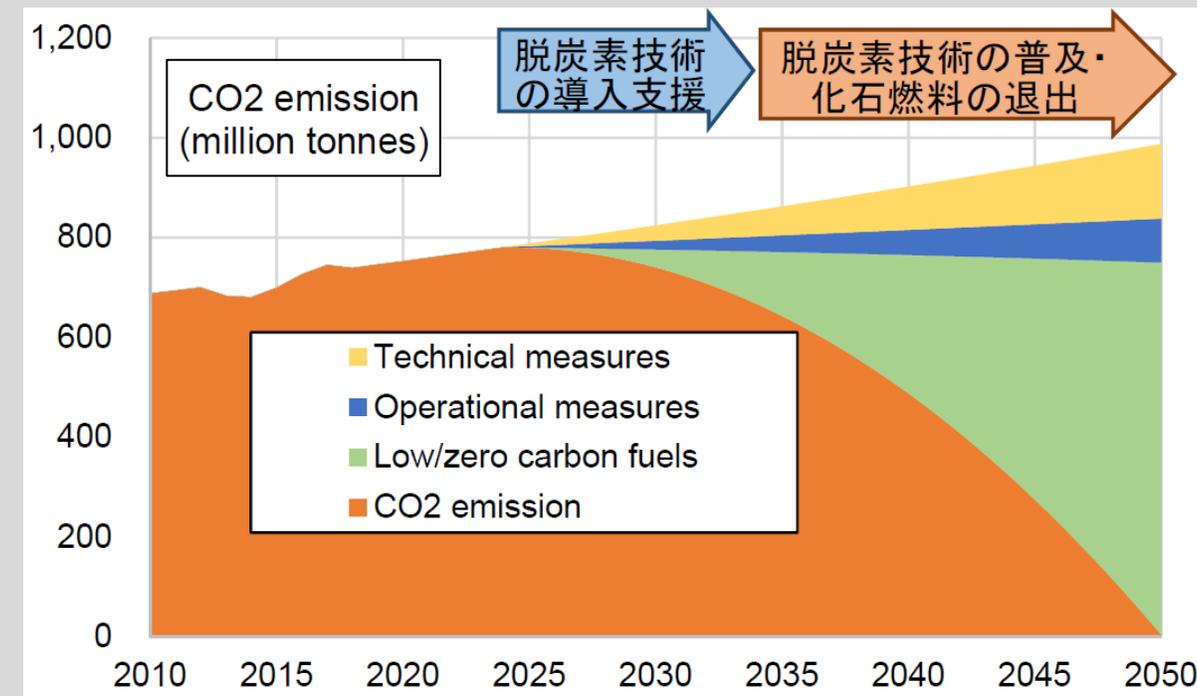
1. 研究背景と目的
2. 主機シミュレーションモデルの開発と故障解析
3. 異常診断ロジックの構築
4. まとめと今後

研究の背景

MEPC80: 2050年までのGHG排出ネットゼロが目標 → 運用最適化: 広範な条件下でのエミッション監視が必要不可欠

GHG削減シナリオ*

ゼロエミ燃料転換が進みつつ、既存燃料船も一定数は残る



>>>

本研究のターゲット



燃料転換

→ 新技術の開発によるゼロエミ燃料の導入



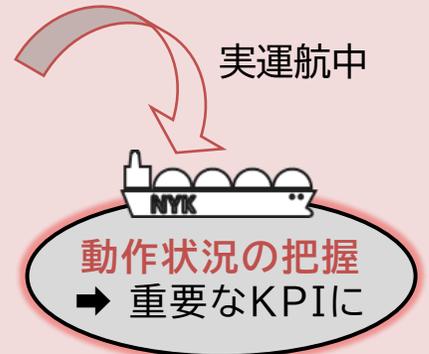
既存燃料

→ 設計/運用最適化による作動状況の改善

稼働条件

- ・ 海気象
- ・ 航路選定
- ・ 燃料性状
- ・ 主機異常
- etc...

実運航中



状態診断の必要性

自動車業界: 実走行での排気性能評価(RDE*)が導入 → 故障検出: 車載診断(OBD)でエミッションが一定基準以下と保証

稼働 -

経年劣化や厳しい条件下での運転継続

故障 -

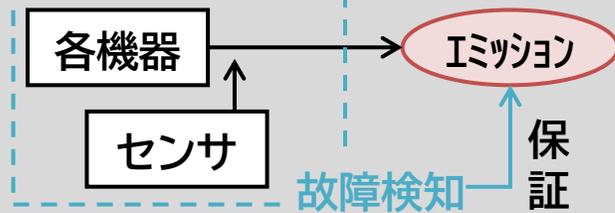
不具合などの異常の兆候や故障の発生

影響 -

燃焼効率の低下などエミッション悪化

船舶の場合では…
重大事故の場合は安全性にも影響あり

OBD(On-Board Diagnostics)

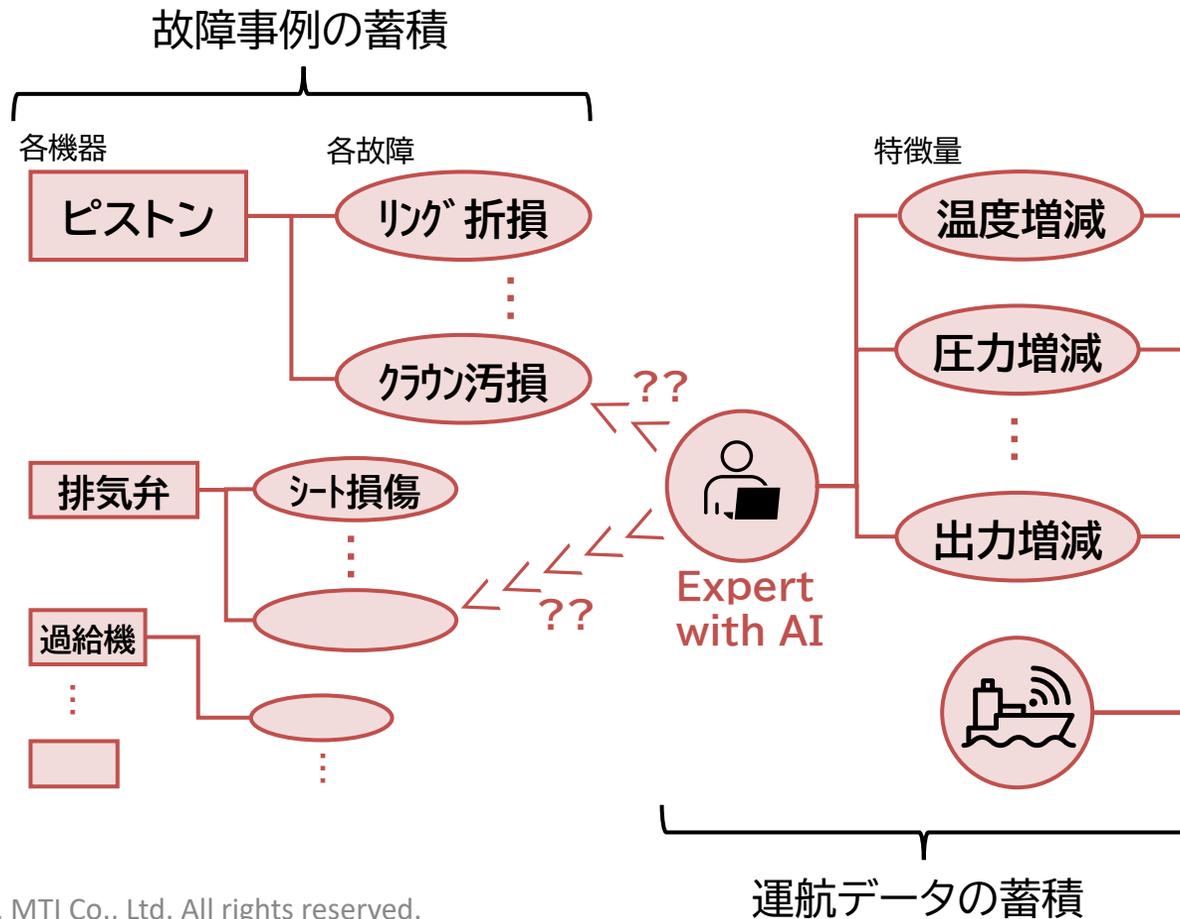


主機関の定量的な状態診断

- ✓ 安全 = エミッション増加の防止
- ✗ 海運業界での実現例はない

現状とアプローチ

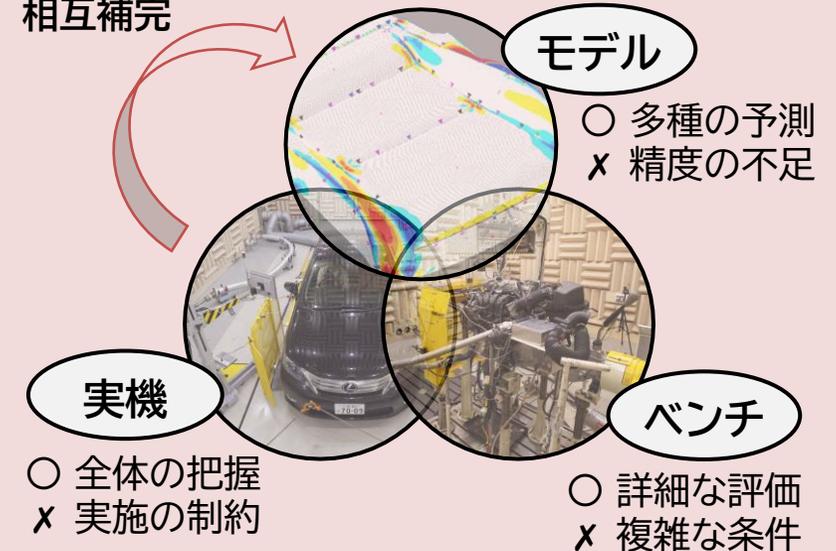
手法構築: 実機試験で全条件を網羅することは困難 → デジタルエンジニアリングの活用: 幅広い条件や仮定に基づき検討



Model Based Development

シミュレーション技術を活用した開発
→ 精度向上や開発検証のプロセス加速

相互補完

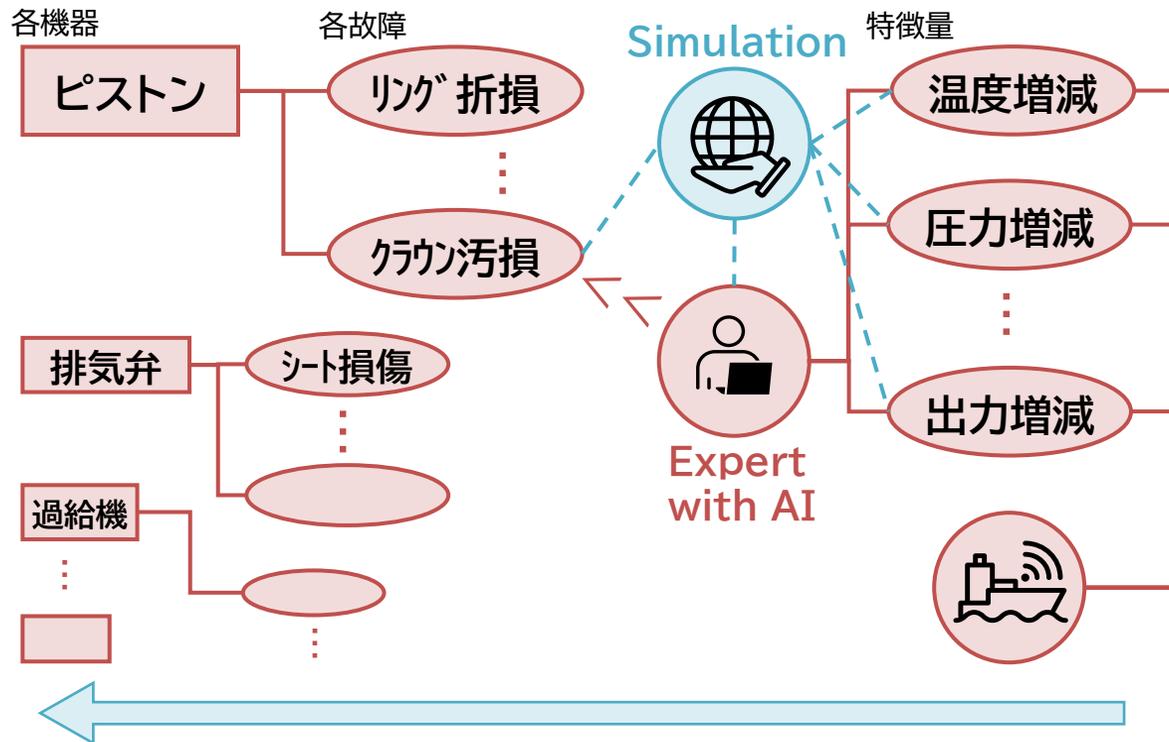


有効
<<<

研究の目的

船用主機関シミュレーションの開発: 各故障シナリオのプロセス説明 → 定量的かつ詳細な主機状態診断手法の構築

① 検出対象を決めて故障プロセス説明



研究の概要

- ① 船用主機関シミュレーションの開発
→ 各故障シナリオの特微量変化を説明
- ② 故障箇所および原因推定手法を構築
→ 特微量変化に基づく故障原因の決定

幅広い条件下で健全に主機を運用
→ 船舶の安全/エミッション性能を保証

② 計測点と診断手法の策定

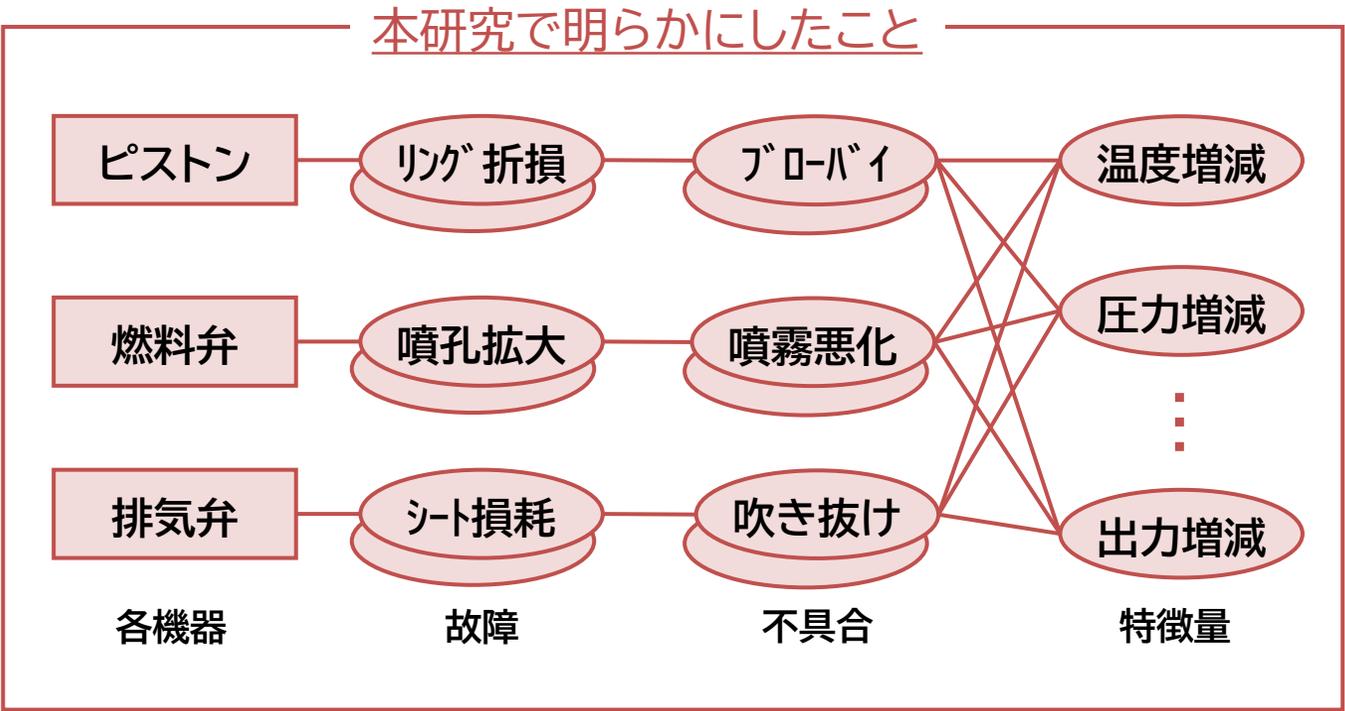
目次

1. 研究背景と目的
2. 主機シミュレーションモデルの開発と故障解析
3. 異常診断ロジックの構築
4. まとめと今後

シミュレーションによる故障挙動解析



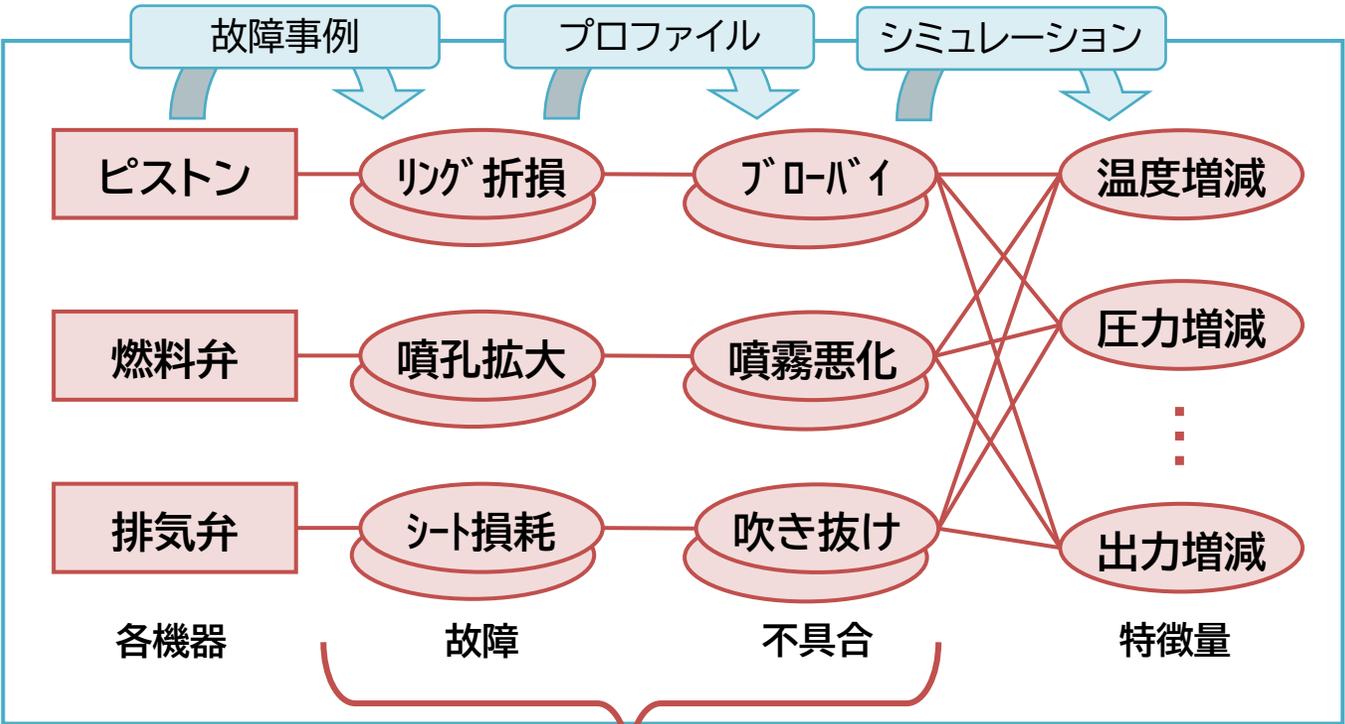
開発したシミュレーションモデルで故障を再現して主機挙動を推定
 ➔ 各種パラメータ変化から故障発生時のプロセス説明を実施



シミュレーションによる故障挙動解析



開発したシミュレーションモデルで故障を再現して主機挙動を推定
 ➔ 各種パラメータ変化から故障発生時のプロセス説明を実施



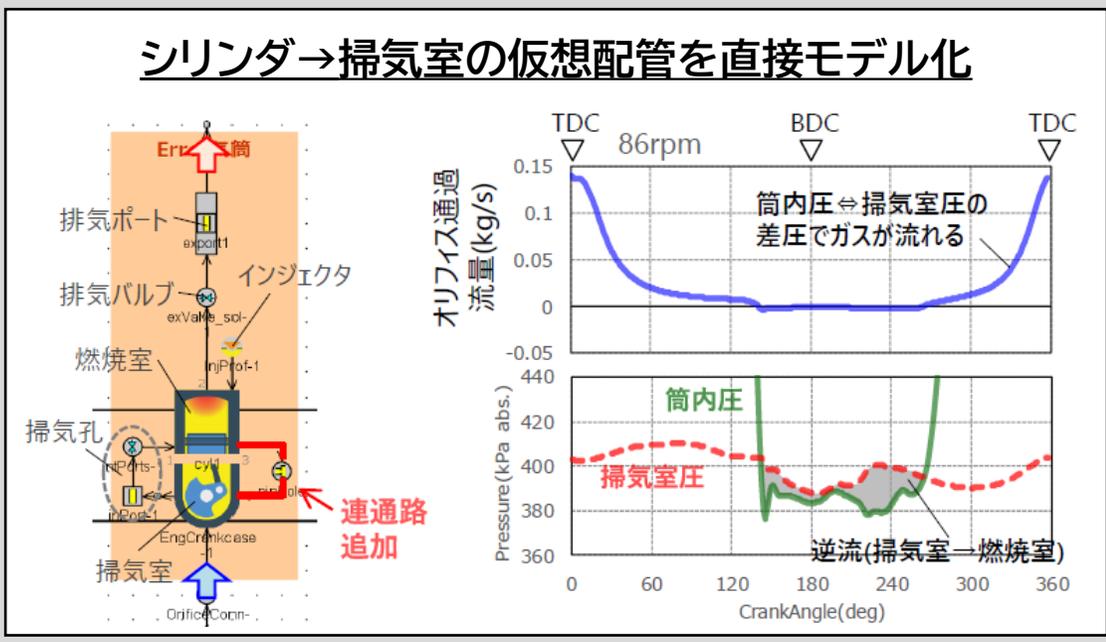
モデル化し実装する必要がある

機関故障のモデル化と解析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

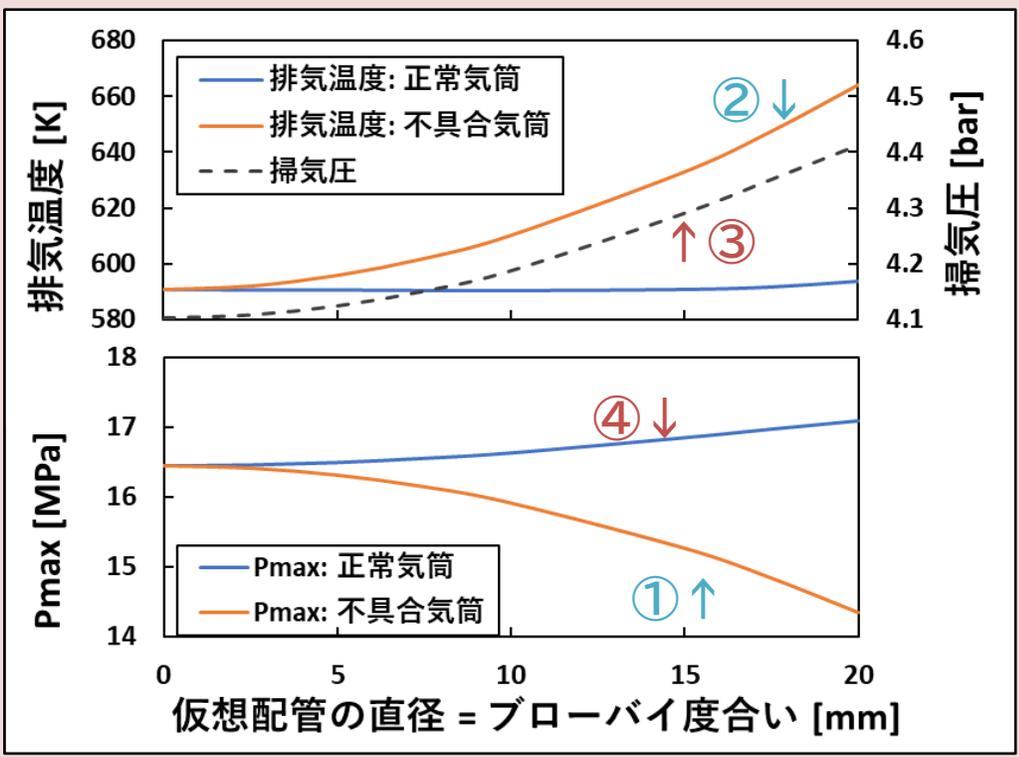
計算の仮定 指示回転数:80 rpm, 目標出力:10,900 kW-

ピストンリング： 燃焼ガスが漏れない様に密閉する機能



解析結果

- 燃費悪化： 質量2%逆流で168→175 g/kWh
- 故障プロセス
 - ✓ 不具合Cyl.
 - ① ガス戻り
 - ② 燃焼悪化
 - ✓ 正常Cyl.
 - ③ 掃気圧up
 - ④ 燃焼改善

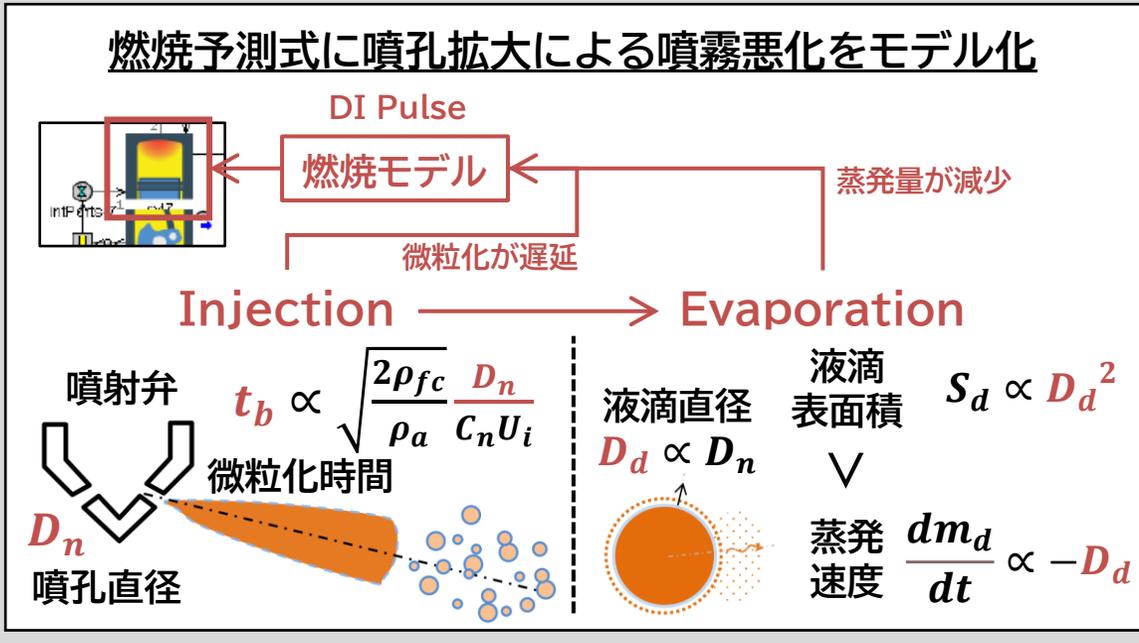


機関故障のモデル化と解析②

不具合模擬の実施例②：燃料噴射弁の噴孔拡大(燃料噴霧の悪化)
 ✓ 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

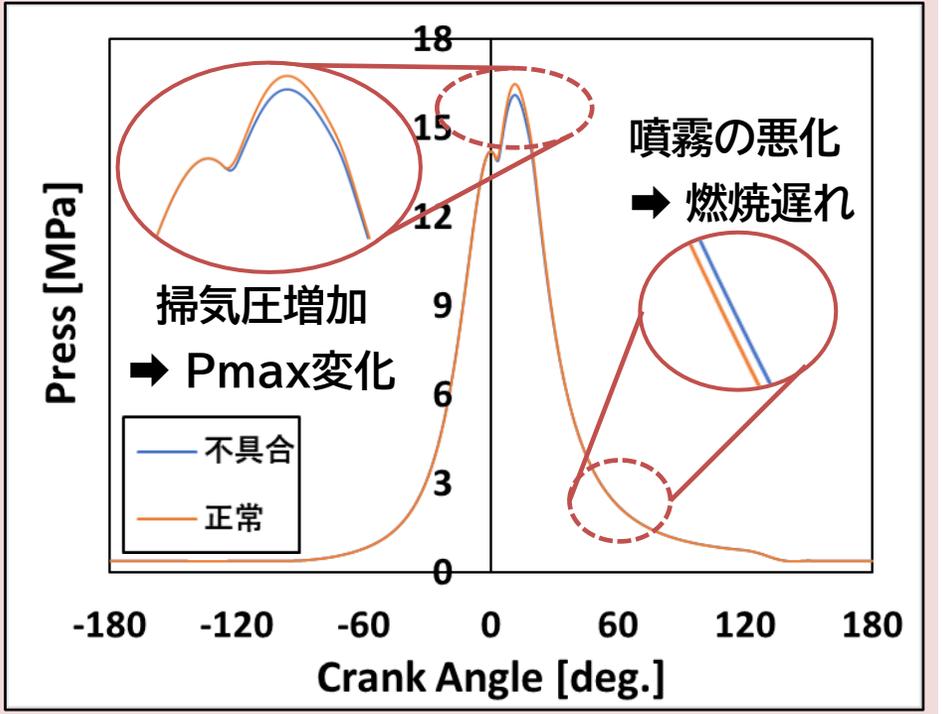
計算の仮定 指示回転数: 80 rpm, 目標出力: 10,900 kW-

燃料噴射弁：ガスを噴霧し液滴分裂と蒸発を促進する機能



解析結果

- 燃費悪化：噴孔径×1.3で168→180 g/kWh
- 故障プロセスはリング折損の場合と同様に…
- ✓ 不具合：燃焼悪化 → 排ガス温 上昇
- ✓ 正常：掃気圧増加 → Pmax 上昇

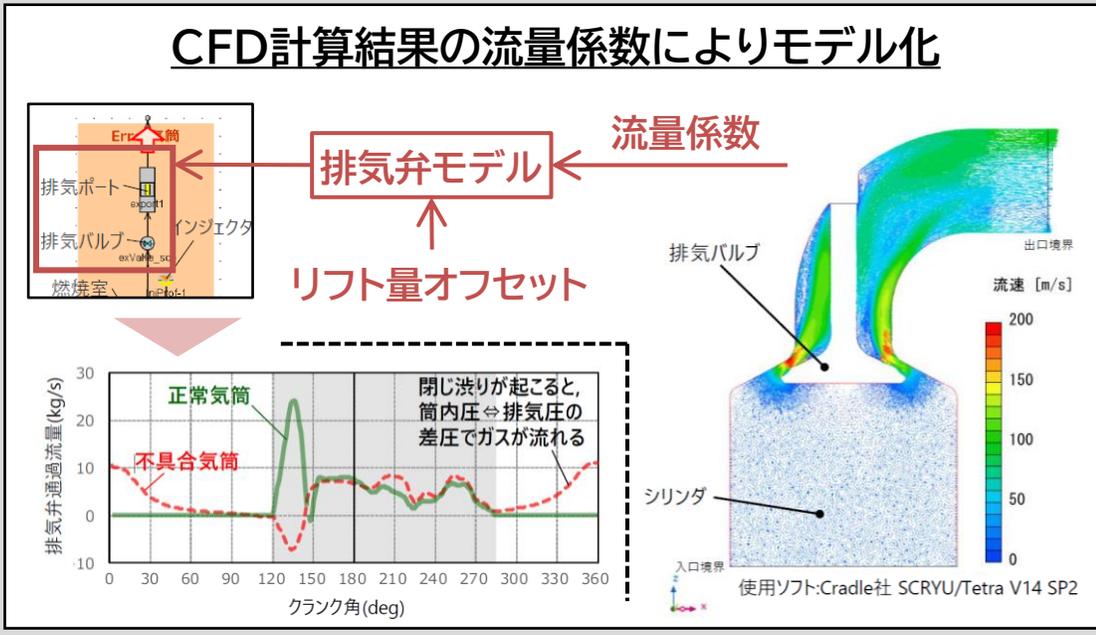


機関故障のモデル化と解析③

不具合模擬の実施例③：排気弁シートの損耗(吹き抜け)
 ✓ 排気弁の**最小リフト量**を開く方向にオフセットして再現

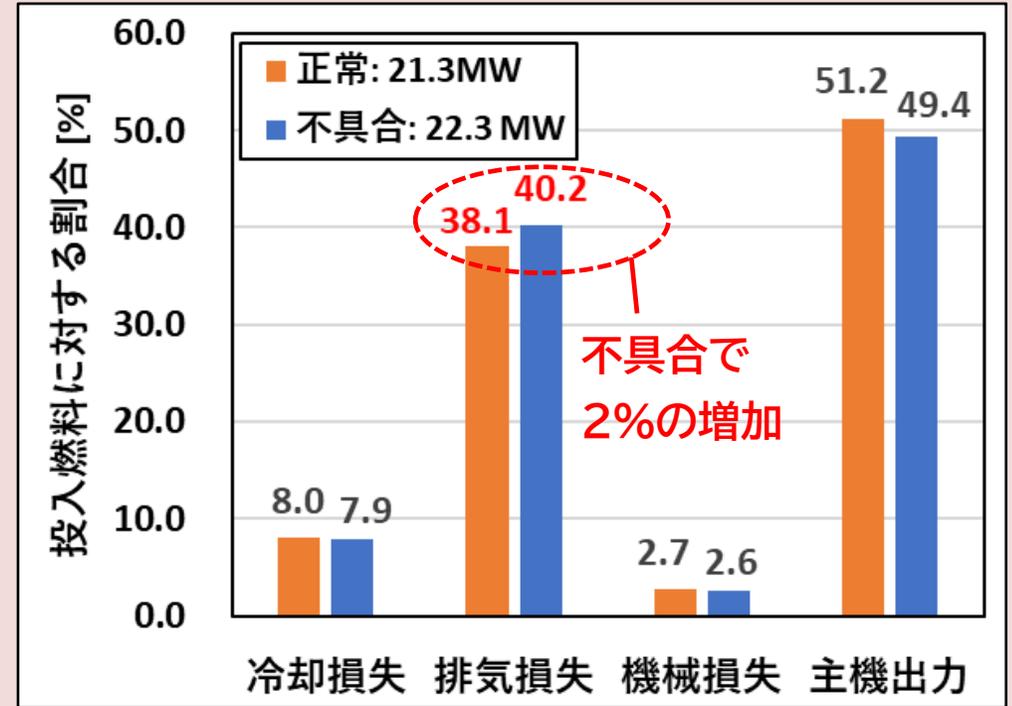
計算の仮定 指示回転数:80 rpm, 目標出力:10,900 kW-

排気弁：燃焼室内の排気ガス流れを制御する機能



解析結果

- 燃費はリフトオフセット量×3で168→173 g/kWh
- 故障プロセスはリング折損や噴孔拡大とやや異なる
- ✓ 不具合：排気エネルギー流出 → 排ガス温 上昇
- ✓ 正常：掃気圧増加 → Pmax 上昇



目次

1. 研究背景と目的
2. 主機シミュレーションモデルの開発と故障解析
3. 異常診断ロジックの構築
4. まとめと今後

機関異常の診断手法

解析結果

故障プロセス解明のまとめ

- ✓ リング折損: 燃焼ガス戻りによる燃焼悪化
- ✓ 噴孔拡大: 噴霧悪化による着火遅延と後燃え
- ✓ 排気弁損耗: 閉弁不良による排気エネルギー増加

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

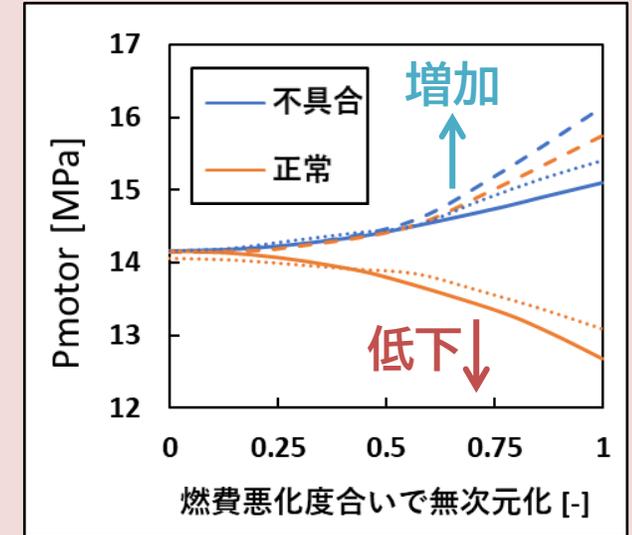
同様のパラメータ変化のため故障の差別化困難

影響がより顕著な特徴量を探索

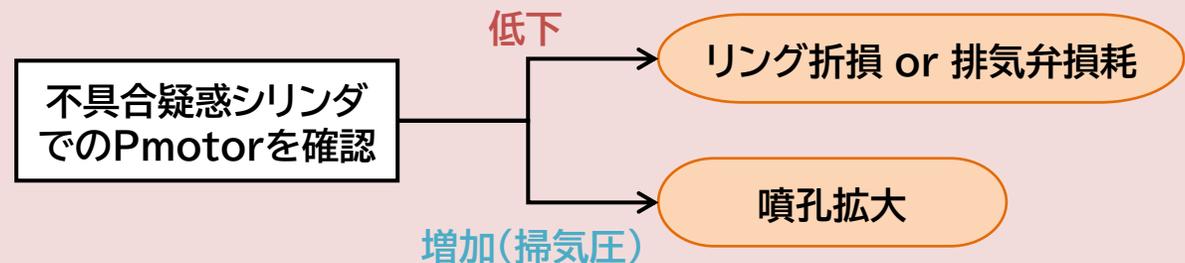
圧縮行程の考察

不具合気筒のPmotor変化は…

- ✓ リング折損(— 実線):
➔ ブローバイ発生により低下
- ✓ 噴孔拡大(--- 破線):
➔ 掃気圧upの影響のみで増加
- ✓ 排気弁損耗(… 点線):
➔ 排気ガスの漏洩により低下



計測点の策定と故障診断



機関異常の診断手法

解析結果

故障プロセス解明のまとめ

- ✓ リング折損: 燃焼ガス戻りによる燃焼悪化
- ✓ 噴孔拡大: 噴霧悪化による着火遅延と後燃え
- ✓ 排気弁損耗: 閉弁不良による排気エネルギー増加

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

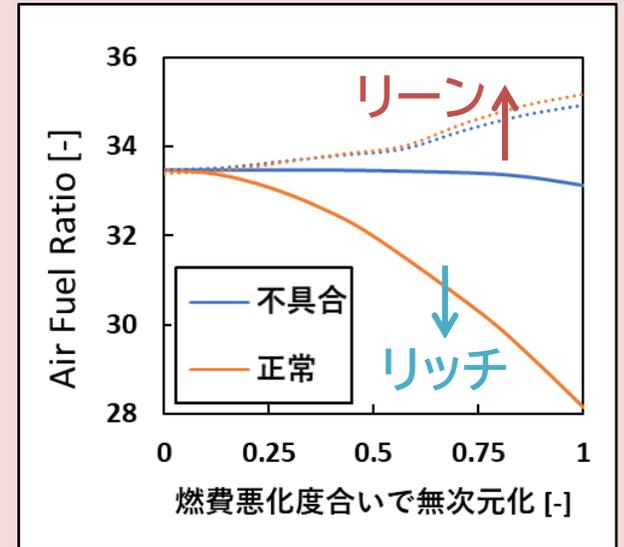
同様のパラメータ変化のため故障の差別化困難

影響がより顕著な特徴量を探索

ガス性状の考察

不具合気筒のA/F(空燃比)変化は…

- ✓ リング折損(— 実線):
 - ➔ 燃焼ガスが掃気に混入
 - ➔ 酸素濃度低下でA/Fリッチ
- ✓ 排気弁損耗(… 点線):
 - ➔ 吹き抜けガスは排出
 - ➔ 掃気圧上昇でA/Fリーン



計測点の策定と故障診断



機関異常の診断手法

解析結果

故障プロセス解明のまとめ

- ✓ リング折損: 燃焼ガス戻りによる燃焼悪化
- ✓ 噴孔拡大: 噴霧悪化による着火遅延と後燃え
- ✓ 排気弁損耗: 閉弁不良による排気エネルギー増加

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

同様のパラメータ変化のため故障の差別化困難

影響がより顕著な特徴量を探索



燃焼状況の考察

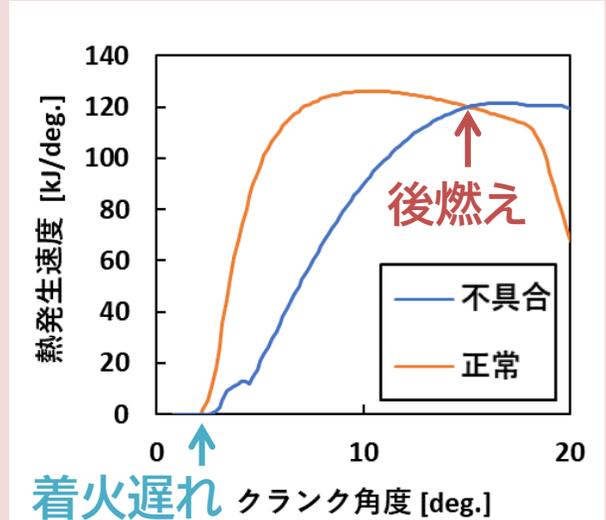
不具合気筒の熱発生速度は…

- ✓ 噴孔拡大: 着火遅れ + 後燃え

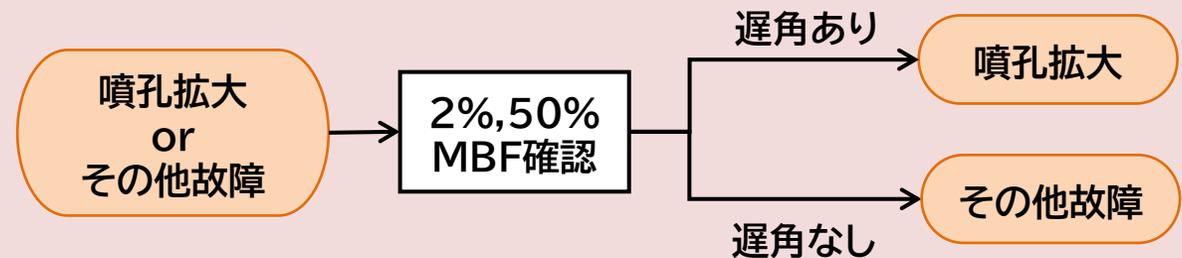
$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} V \frac{dp}{d\theta} + \frac{\kappa}{1 - \kappa} p \frac{dV}{d\theta}$$

| 故障 | 2% MBF | 50% MBF |
|-------|--------|---------|
| リング折損 | 1.18 | 12.7 |
| 噴孔拡大 | 2.87 | 16.9 |
| 排気弁損耗 | 1.18 | 12.5 |

Case: 噴孔拡大×2



計測点の策定と故障診断



機関異常の診断手法

計測項目の考察

故障プロセス解明のまとめ

- ✓ リング折損: 燃焼ガス戻りによる燃焼悪化
- ✓ 噴孔拡大: 噴霧悪化による着火遅延と後燃え
- ✓ 排気弁損耗: 閉弁不良による排気エネルギー増加

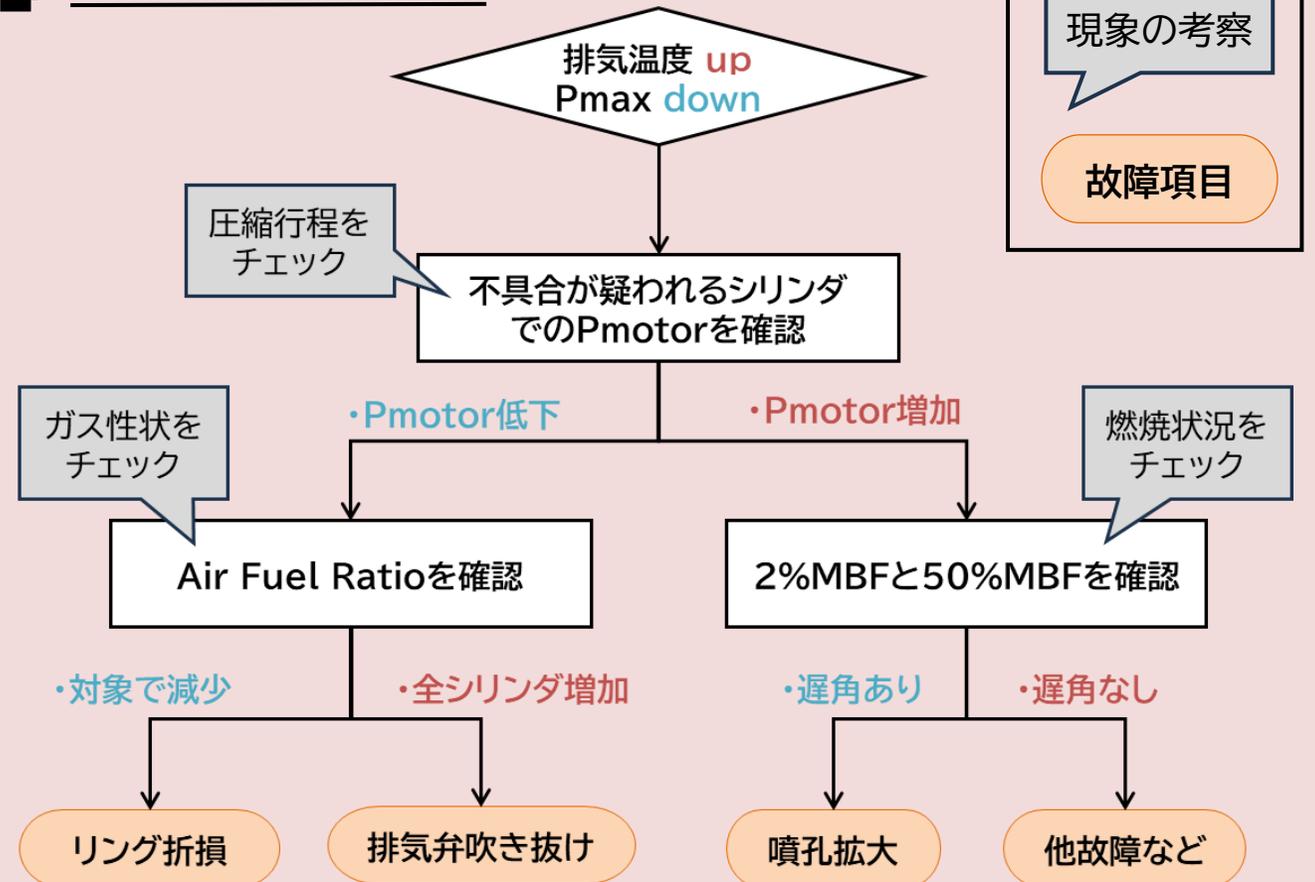
| 故障 | Pmotor | A/F | MBF |
|-------|--------|------|------|
| リング折損 | 低下 | 減少 | 変化なし |
| 噴孔拡大 | 増加 | 増加 | 変化なし |
| 排気弁損耗 | 低下 | 変化なし | 遅角 |

プロセス考察と特徴量探索

➔ 故障箇所特定ロジック構築



故障診断の分類木



目次

1. 研究背景と目的
2. 主機シミュレーションモデルの開発と故障解析
3. 異常診断ロジックの構築
4. まとめと今後

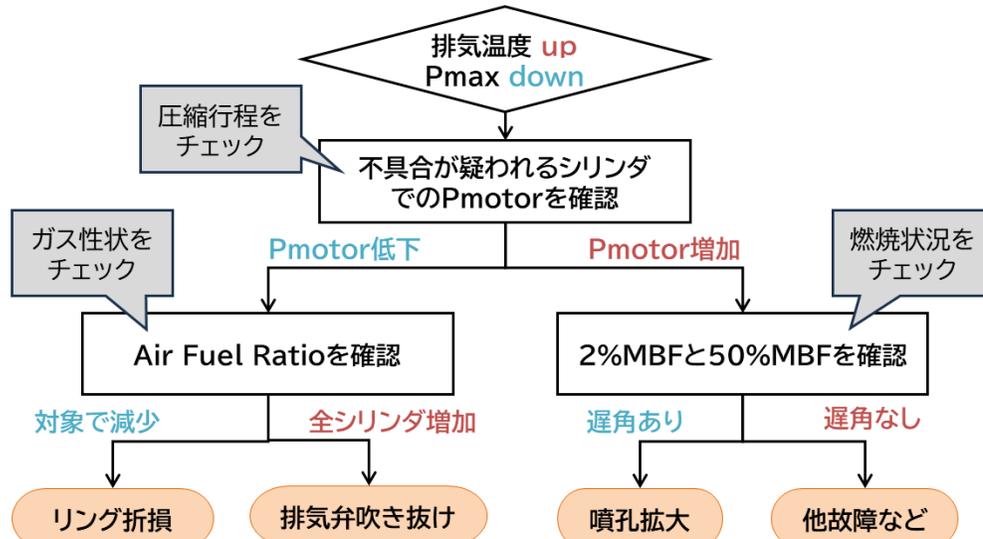
本研究のまとめ

- シミュレーションによる故障箇所推定手法の構築 -

① 燃焼室部品の故障モデル化とプロセス説明

- ✓ リング折損: 燃焼ガス戻りによる燃焼悪化
- ✓ 噴孔拡大: 噴霧悪化による着火遅延と後燃え
- ✓ 排気弁損耗: 閉弁不良による排気エネルギー増加

② 特徴量探索による故障箇所推定の分類木検討



今後の課題

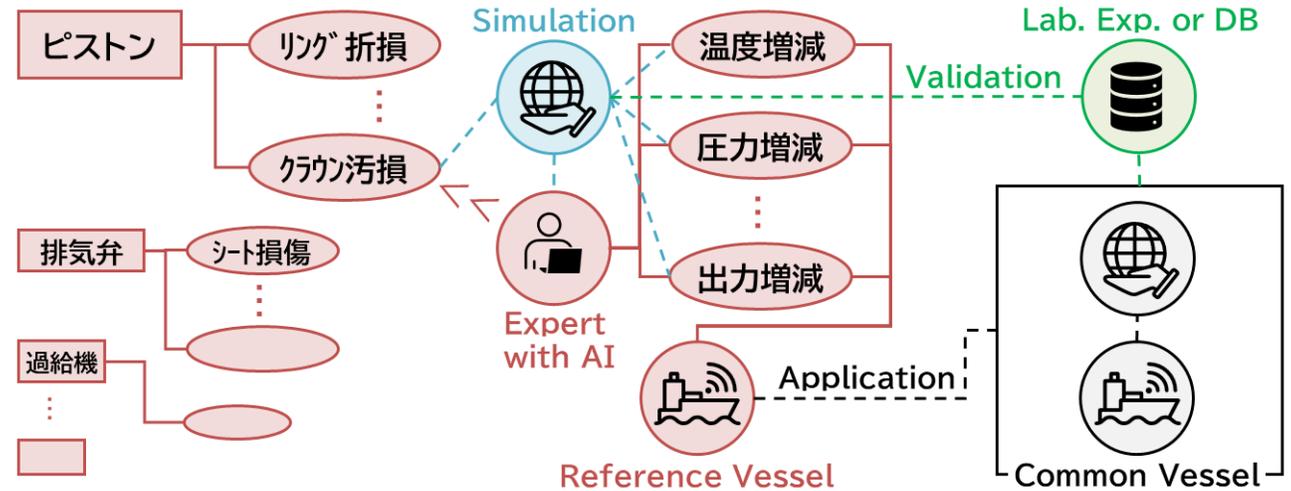
- 実稼働条件下での健全な主機運用と安全/エミッション性能保証 -

① 故障解析の信頼性確認

- ✓ 要素試験とオペレーションデータによる解析結果の比較検証
- ✓ 新燃料転換や新技術搭載における予期せぬ新規事例への対応

② 故障診断ロジックの本船実装

- ✓ 故障診断データベースや自動診断システムへの落とし込み
- ✓ 運航船の観測値を活用したデータ同化による対象船の拡大



ご清聴ありがとうございました。