



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

小知井 秀馬*1 渡部 潤*1 大石智生*1

井上伸一*2

小木曾 誠人*3 吉村 裕史*3

目次

1. 研究背景と目的
2. 主機関1Dシミュレーションの開発
3. シミュレーションによる故障診断
4. 故障(不具合)発生時の再適合評価
5. まとめと今後の課題



目次

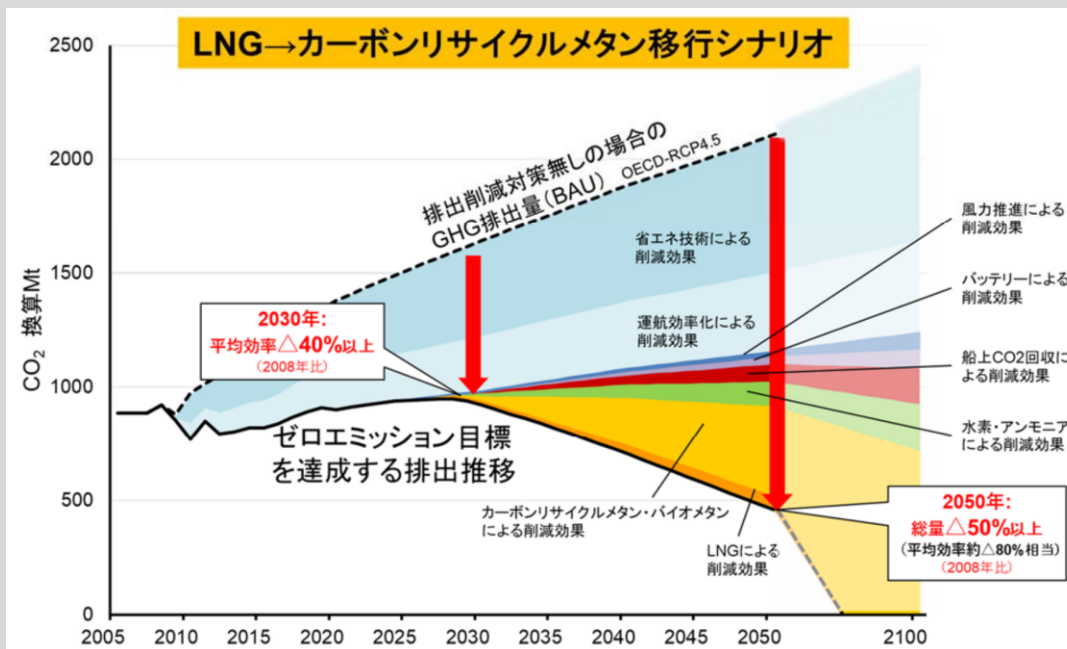
1. 研究背景と目的
2. 主機関1Dシミュレーションの開発
3. シミュレーションによる故障診断
4. 故障(不具合)発生時の再適合評価
5. まとめと今後の課題



研究背景(最適運航)

脱炭素化の機運：2050年までの**GHG排出ネットゼロ**が目標(MEPC80)

GHG削減シナリオ*



燃料転換

➡ 新技術の開発による
ゼロエミ燃料の導入



運航効率化

➡ 設計/運用最適化で
作動状況の改善



研究背景(故障解析)

広範な条件下での性能確保：主機のライフサイクル全体で最適運用が必要

運航 - 

経年劣化や過酷条件での運転

故障 - 

部品の不具合など異常の発生

影響 - 

燃焼効率の低下など性能悪化

認知されていない可能性も



研究背景(故障解析)

広範な条件下での性能確保：主機のライフサイクル全体で最適運用が必要

運航 - 

経年劣化や過酷条件での運転

故障 - 

部品の不具合など異常の発生

影響 - 

燃焼効率の低下など性能悪化

認知されていない可能性も

OBD(On-Board Diagnostics)

各機器

センサ

ミッション

故障検知

保証

>>>



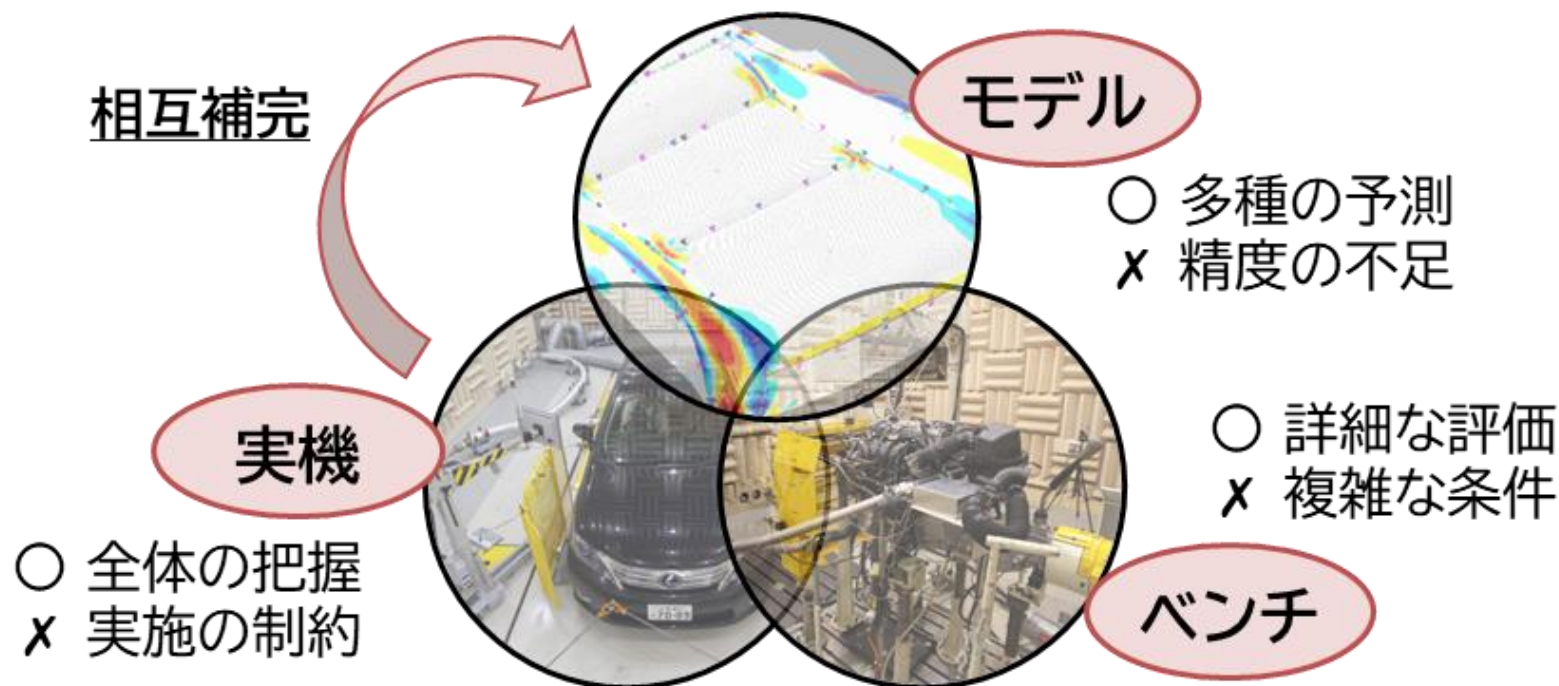
主機関の状態診断と対応機能

- ✓ 不具合や異常を自動検知
- ✓ 実状態に応じた主機制御

研究背景(シミュレーション活用)

MBD(Model Based Development)に基づくシミュレーション活用

適合や評価の精度向上、開発検証プロセスを加速



*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/>



研究目的

主機1Dシミュレーションによる**故障解析を船舶運航へ応用**する手法の検討

① 主機関1Dシミュレーションの開発

- ✓ GT-Powerを用いて主機シミュレーションモデルを構築

② シミュレーションによる故障診断

- ✓ ピストンリング劣化を再現して故障プロセス解明を実施

③ 故障(不具合)発生時の再適合評価

- ✓ 健全/故障発生時の性能変化を比較し燃費性能改善を考察

主機の故障診断と最適運航に向けたパラメータスタディを実施

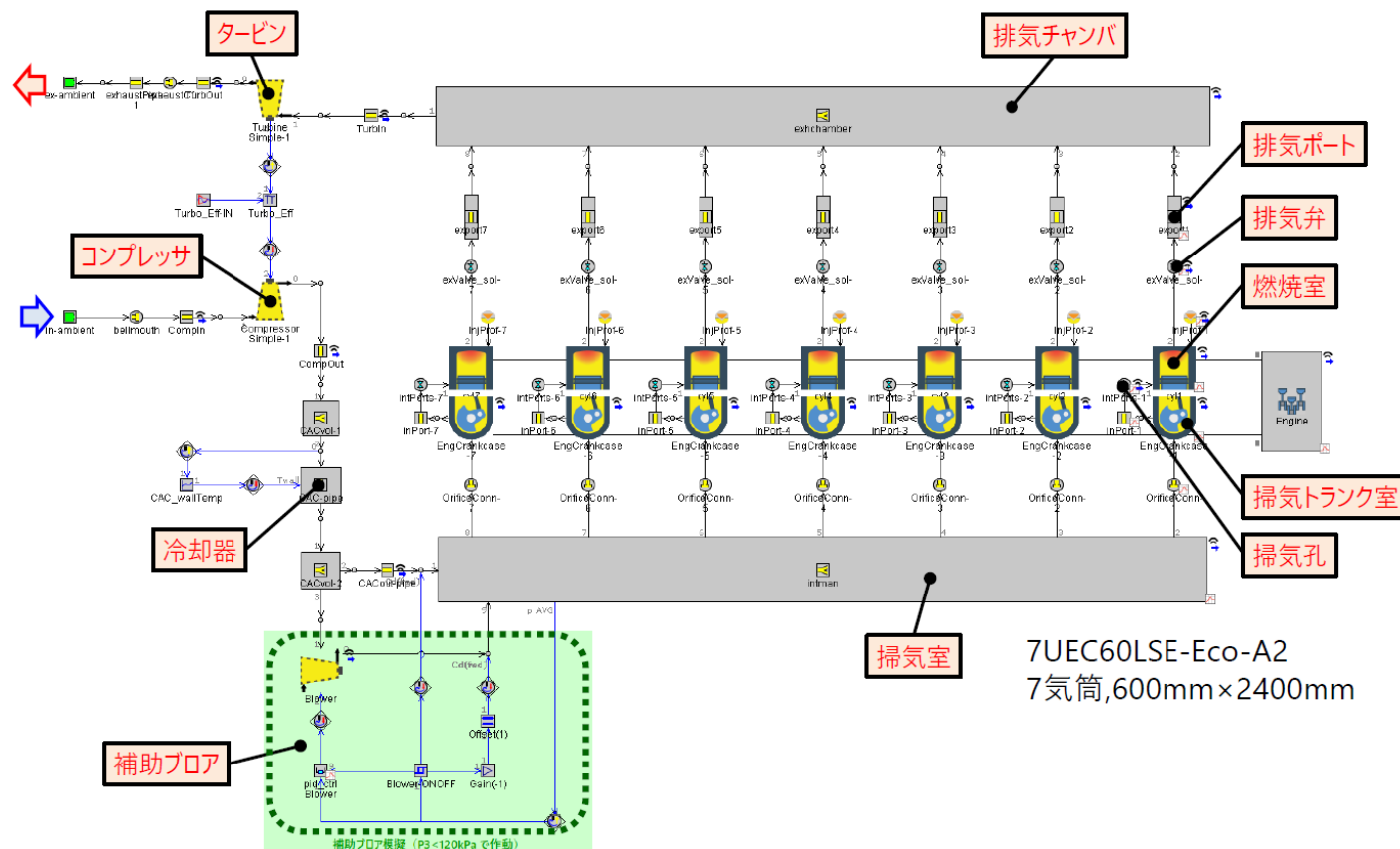


目次

1. 研究背景と目的
2. 主機関1Dシミュレーションの開発
3. シミュレーションによる故障診断
4. 故障(不具合)発生時の再適合評価
5. まとめと今後の課題

シミュレーションモデルの開発

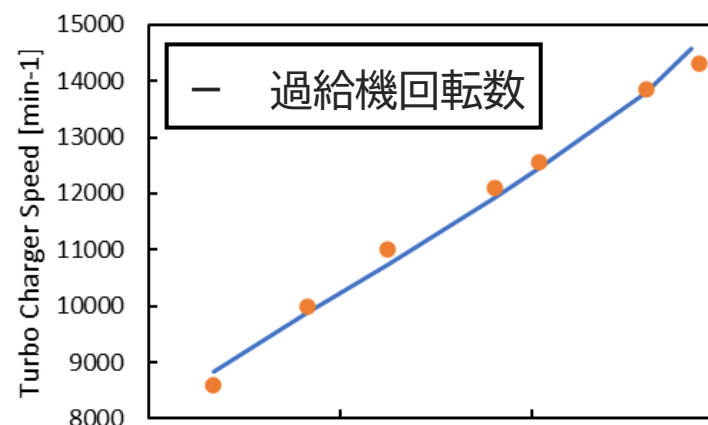
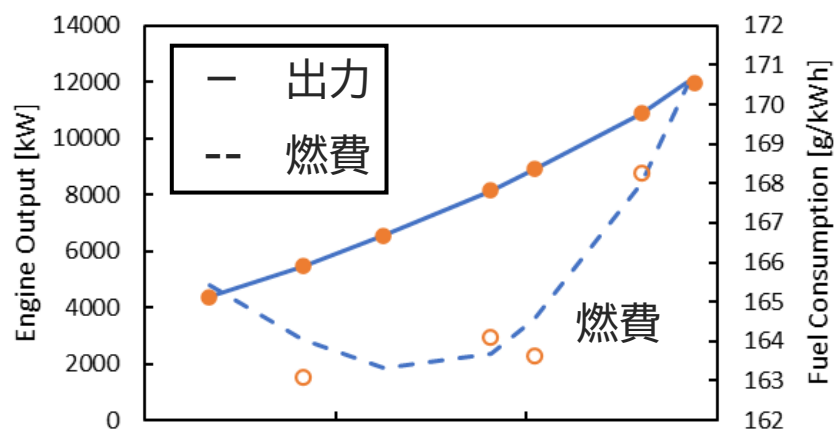
GT-Power: 1次元CFDと予測燃焼予測によるエンジンモデルを構築



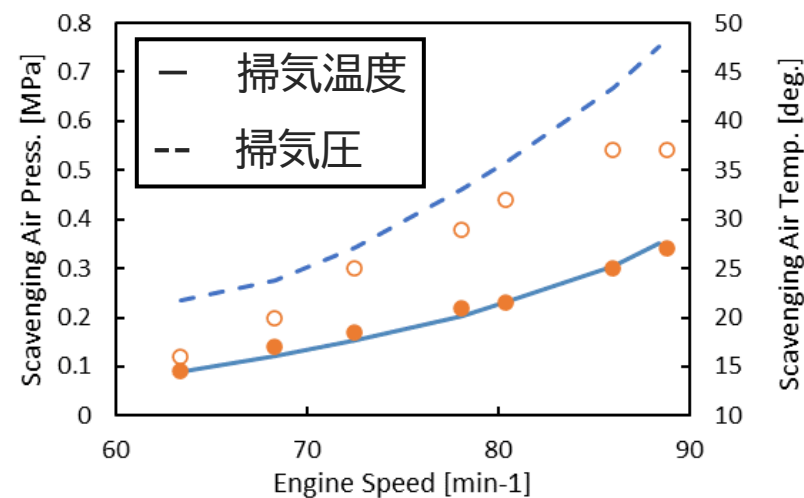
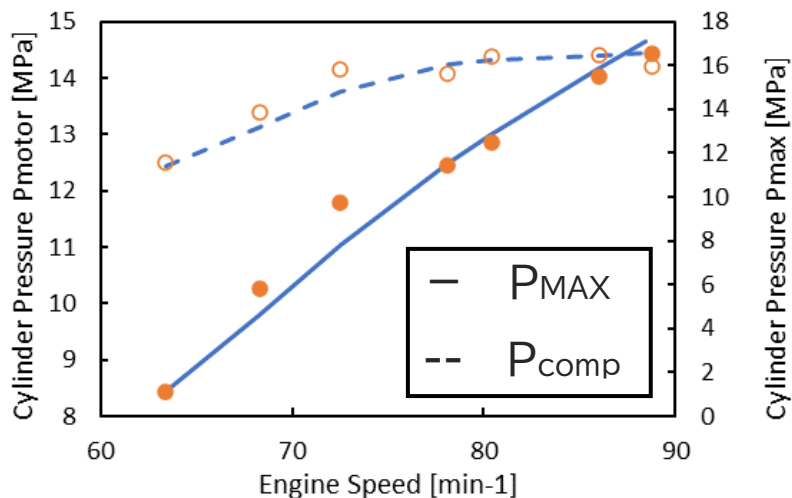


シミュレーションモデルの開発

計算→比較→修正のプロセス実施: **出荷データと概ね一致し性能解析可能**

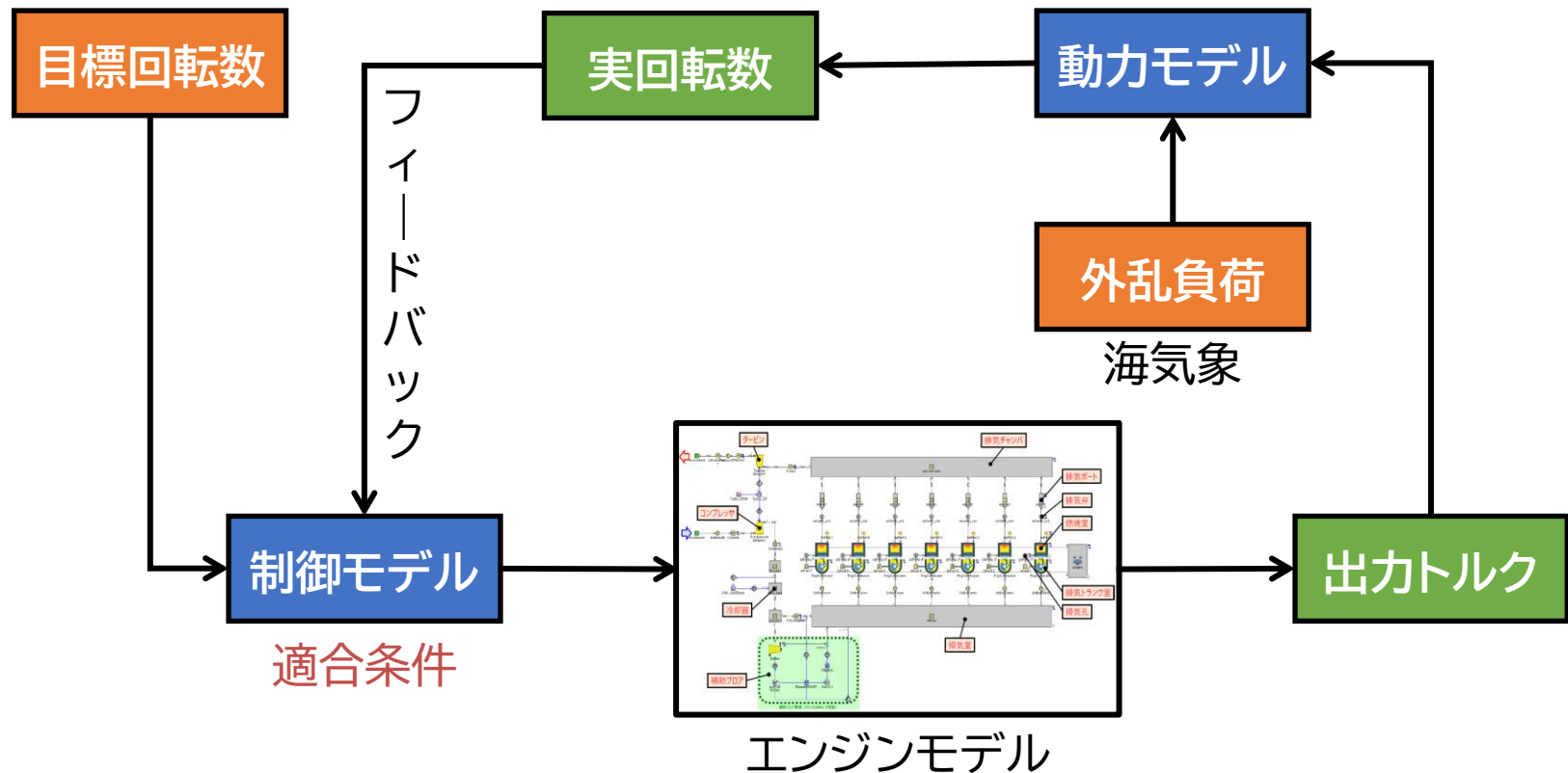


点:実機
線:解析



シミュレーションモデルの開発

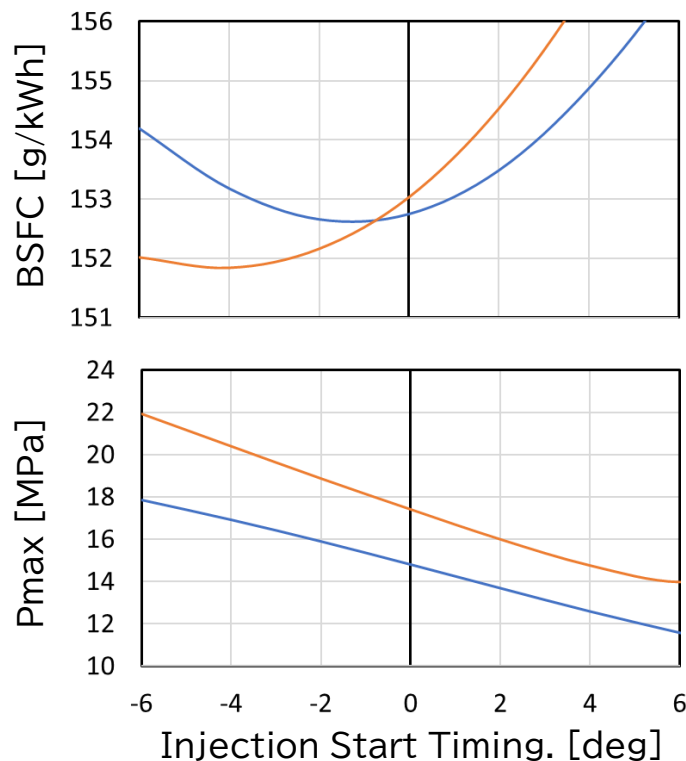
GT-Power: 1次元CFDと予測燃焼予測によるエンジンモデルを構築



シミュレーションモデルの開発

制御モデルの適合: 各回転数×負荷で燃費最適となる条件を探索し決定

燃料噴射タイミングの適合例



– 50%MCR: 68.3 [min-1]

– 75%MCR: 78.1 [min-1]

➤ 動作点により適合条件は異なる

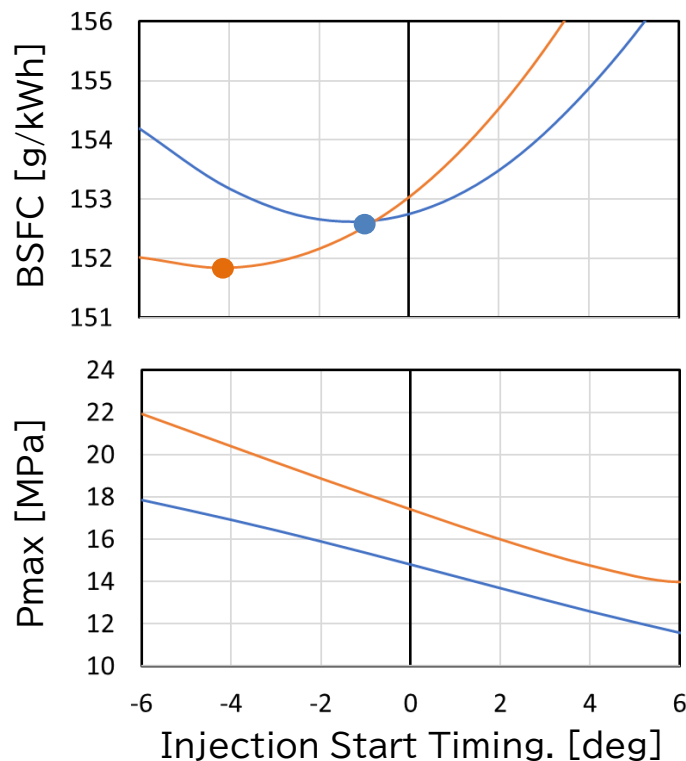
- {
 - EVC: 排気弁閉じ時期
 - Inj. Time: 燃料噴射開始時期



シミュレーションモデルの開発

制御モデルの適合: **各回転数×負荷で燃費最適**となる条件を探索し決定

燃料噴射タイミングの適合例



– 50%MCR: 68.3 [min-1]

– 75%MCR: 78.1 [min-1]

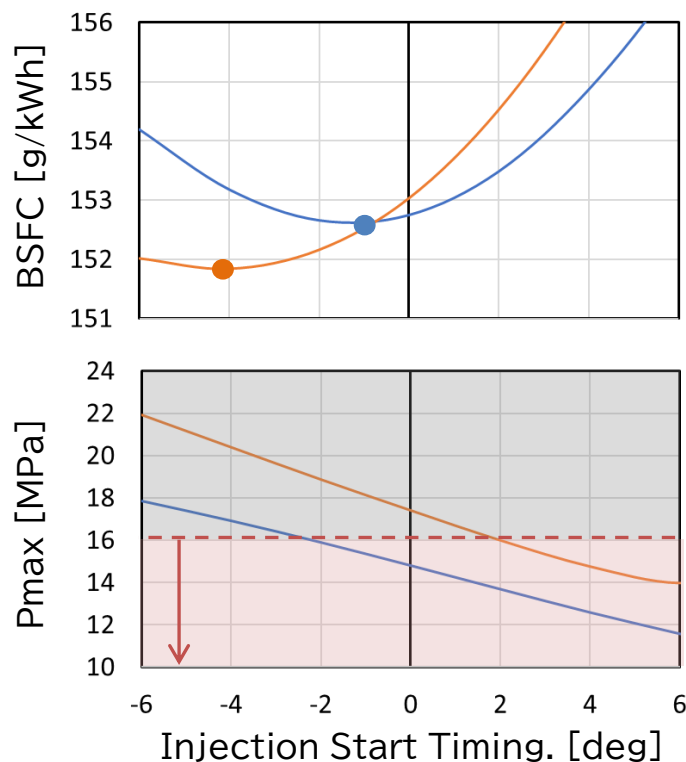
➤ 動作点により**適合条件**は異なる

- EVC: 排気弁閉じ時期
- Inj. Time: 燃料噴射開始時期

シミュレーションモデルの開発

制御モデルの適合: **各回転数×負荷で燃費最適**となる条件を探索し決定

燃料噴射タイミングの適合例



– 50%MCR: 68.3 [min-1]

– 75%MCR: 78.1 [min-1]

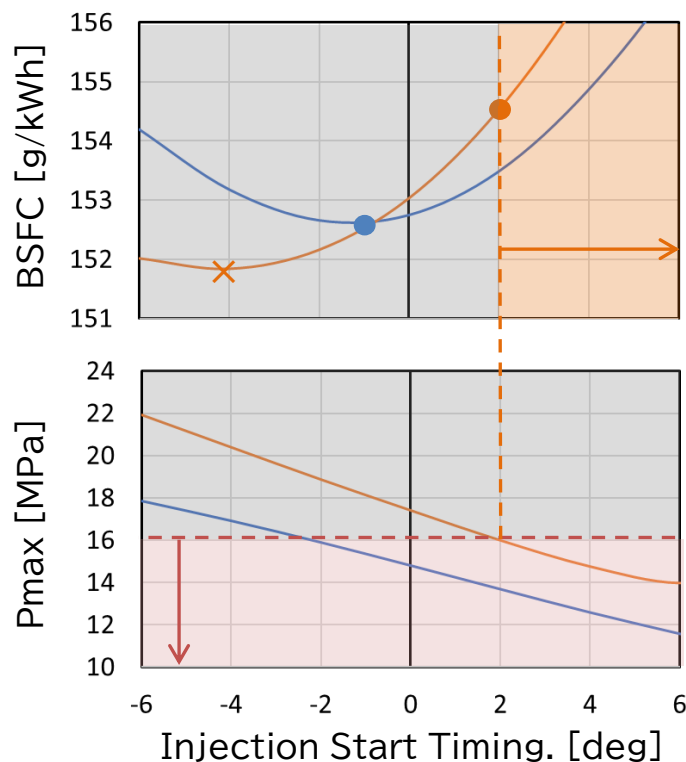
➤ 動作点により**適合条件**は異なる

- {
 - EVC: 排気弁閉じ時期
 - Inj. Time: 燃料噴射開始時期

シミュレーションモデルの開発

制御モデルの適合: 各回転数×負荷で燃費最適となる条件を探索し決定

燃料噴射タイミングの適合例



– 50%MCR: 68.3 [min-1]

– 75%MCR: 78.1 [min-1]

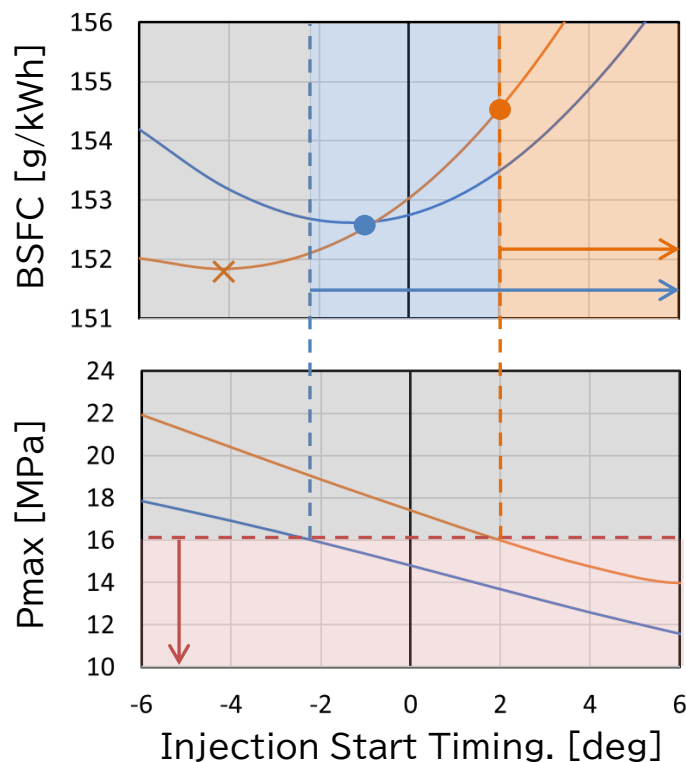
➤ 動作点により適合条件は異なる

- {
 - EVC: 排気弁閉じ時期
 - Inj. Time: 燃料噴射開始時期

シミュレーションモデルの開発

制御モデルの適合: 各回転数×負荷で燃費最適となる条件を探索し決定

燃料噴射タイミングの適合例



– 50%MCR: 68.3 [min-1]

– 75%MCR: 78.1 [min-1]

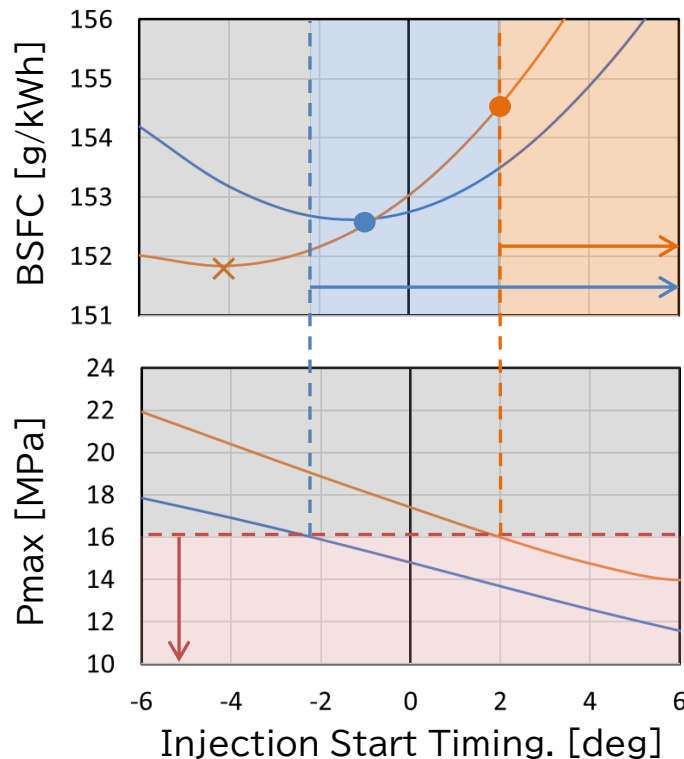
➤ 動作点により適合条件は異なる

- {
 - EVC: 排気弁閉じ時期
 - Inj. Time: 燃料噴射開始時期

シミュレーションモデルの開発

制御モデルの適合: **各回転数×負荷で燃費最適**となる条件を探索し決定

燃料噴射タイミングの適合例



– 50%MCR: 68.3 [min-1]

– 75%MCR: 78.1 [min-1]

➤ 動作点により**適合条件**は異なる

- {
 - EVC: 排気弁閉じ時期
 - Inj. Time: 燃料噴射開始時期

➤ 全条件の確認には多大な実験コスト

➡ シミュレーションを活用した

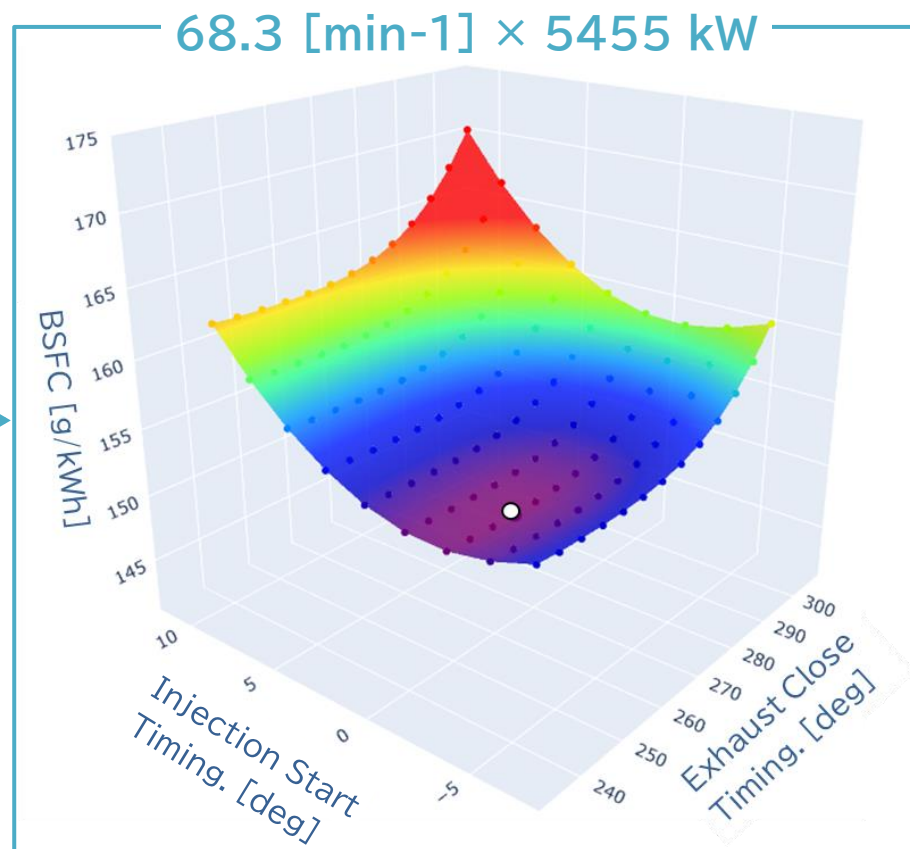
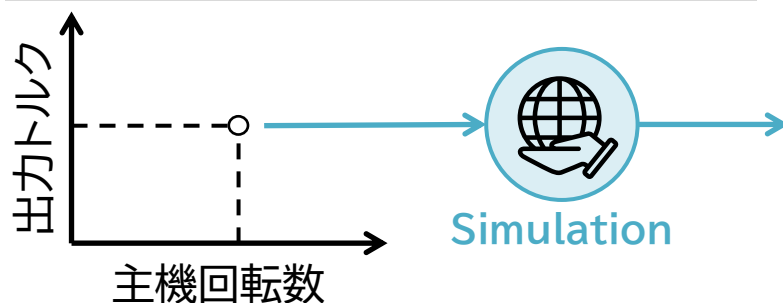
応答曲面法による探索が有効

シミュレーションモデルの開発

制御モデルの適合: **各回転数×負荷で燃費最適**となる条件を探索し決定

応答曲面法による制御適合

- 各動作点の応答曲面を解析
 - ➡ 制約条件を満たす点のうち最適燃費となる条件を探索

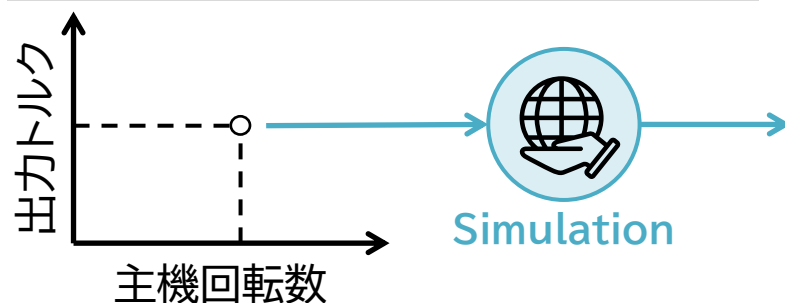


シミュレーションモデルの開発

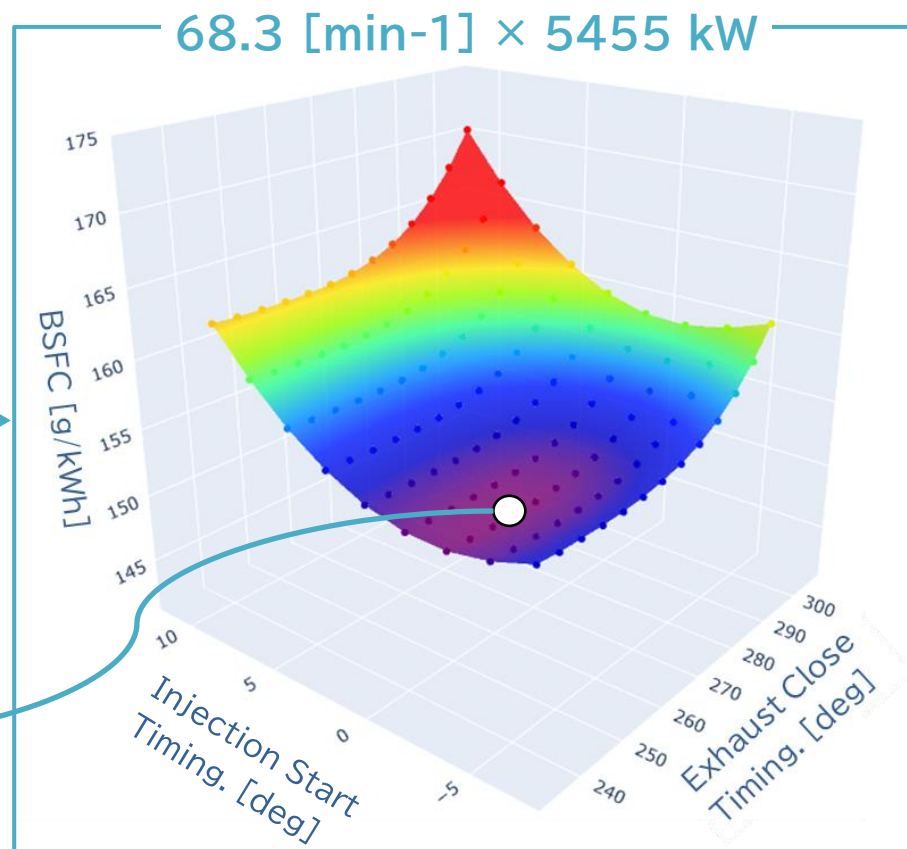
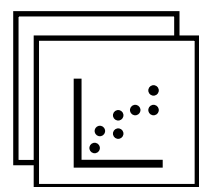
制御モデルの適合: **各回転数×負荷で燃費最適**となる条件を探索し決定

応答曲面法による制御適合

- 各動作点の応答曲面を解析
 - ➡ 制約条件を満たす点のうち最適燃費となる条件を探索



Inj. Start
& EVC. MAP

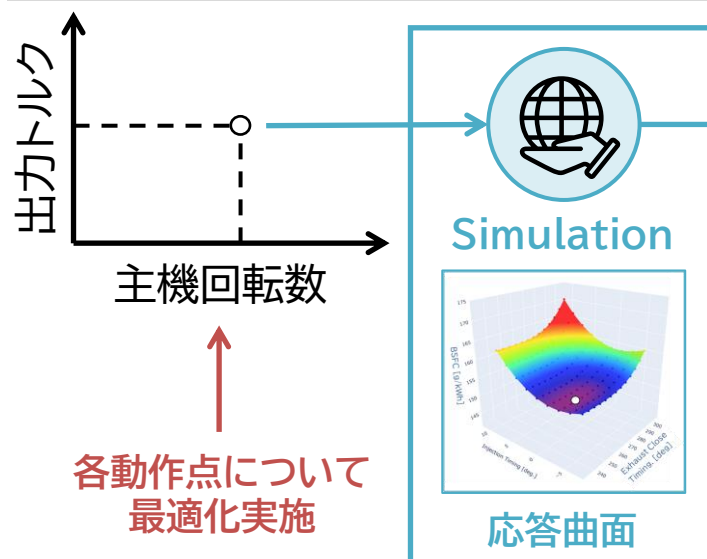


シミュレーションモデルの開発

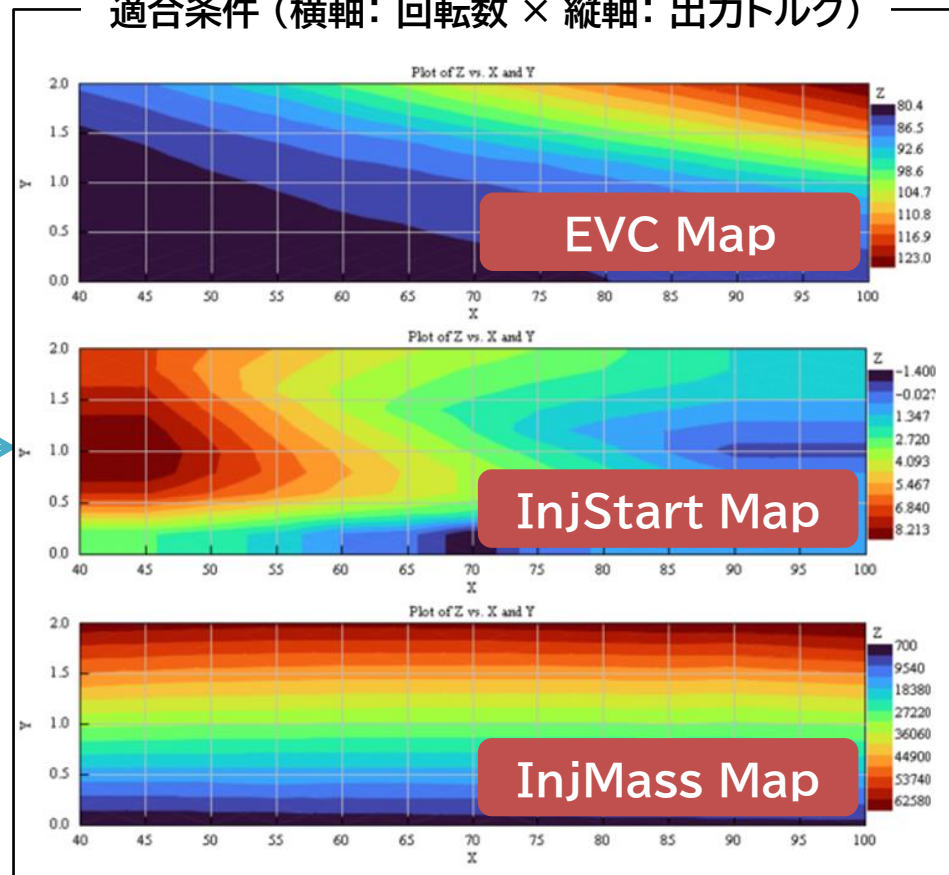
制御モデルの適合: **各回転数×負荷で燃費最適**となる条件を探索し決定

応答曲面法による制御適合

- 各動作点の応答曲面を解析
 - ➡ 制約条件を満たす点のうち最適燃費となる条件を探索



適合条件 (横軸: 回転数 × 縦軸: 出力トルク)



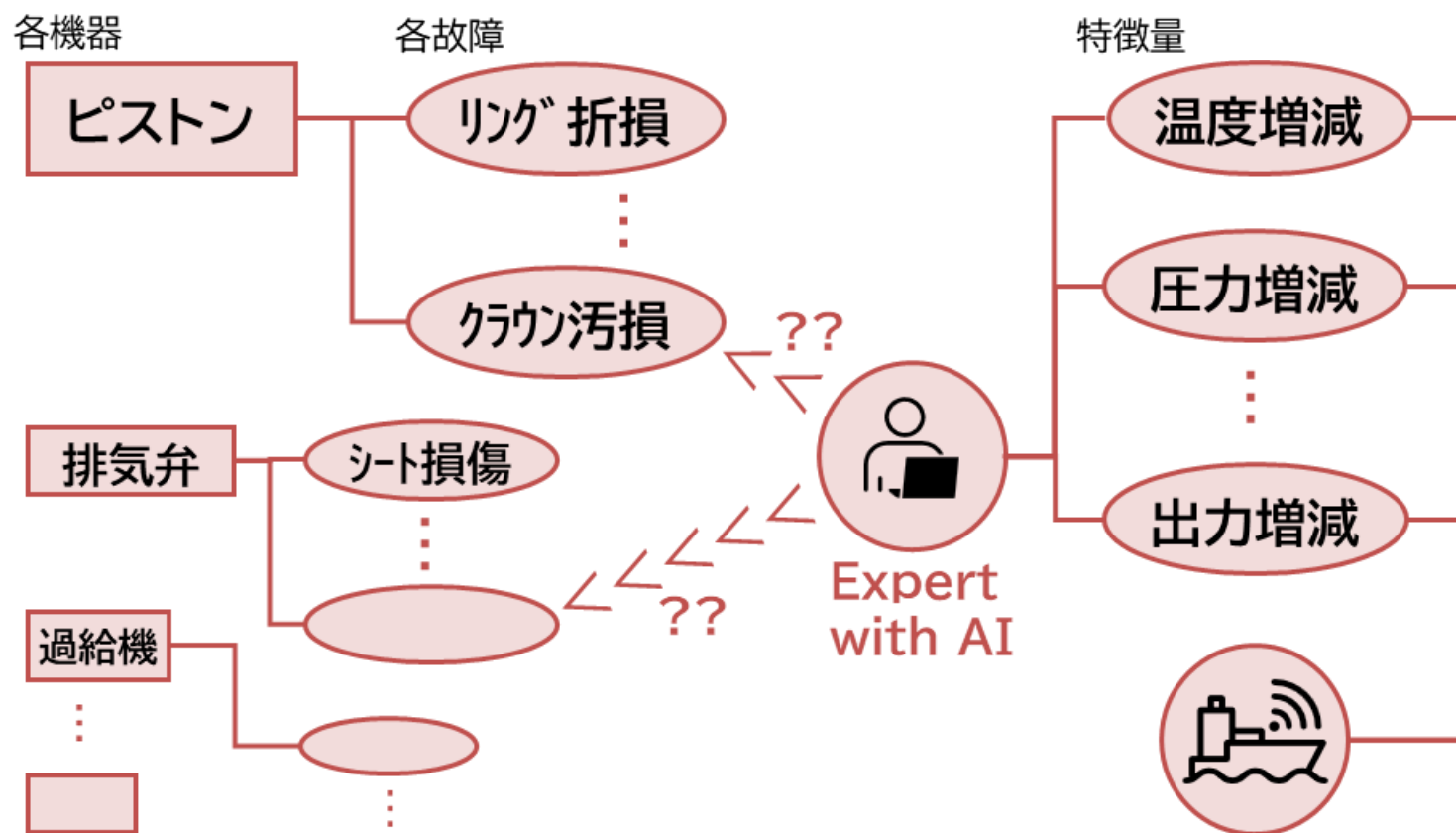
目次

1. 研究背景と目的
2. 主機関1Dシミュレーションの開発
3. シミュレーションによる故障診断
4. 故障(不具合)発生時の再適合評価
5. まとめと今後の課題



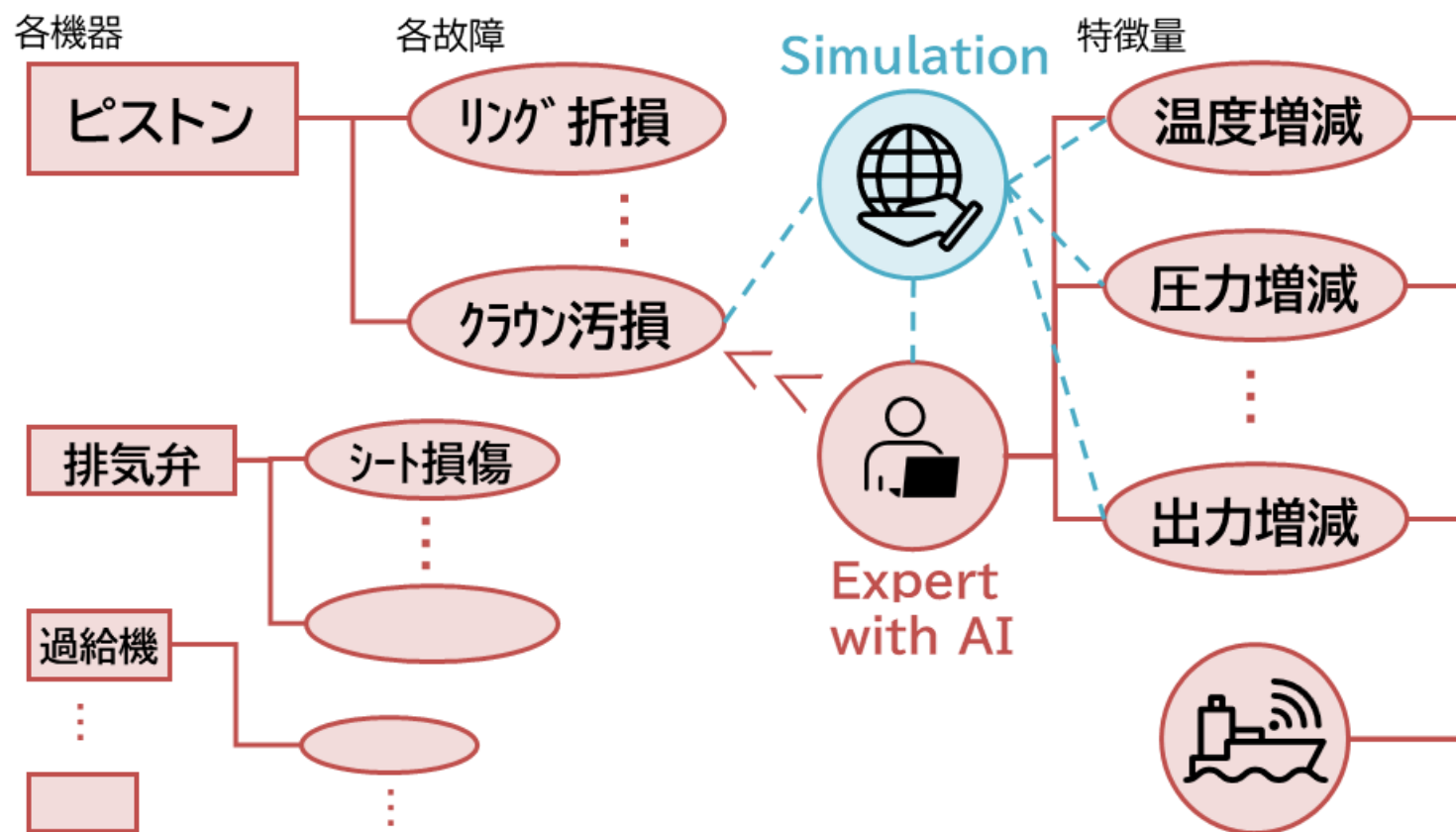
主機関1Dシミュレーションによる故障解析

故障シナリオをモデルに実装：故障と特徴量変化を紐付けて原因を診断



主機関1Dシミュレーションによる故障解析

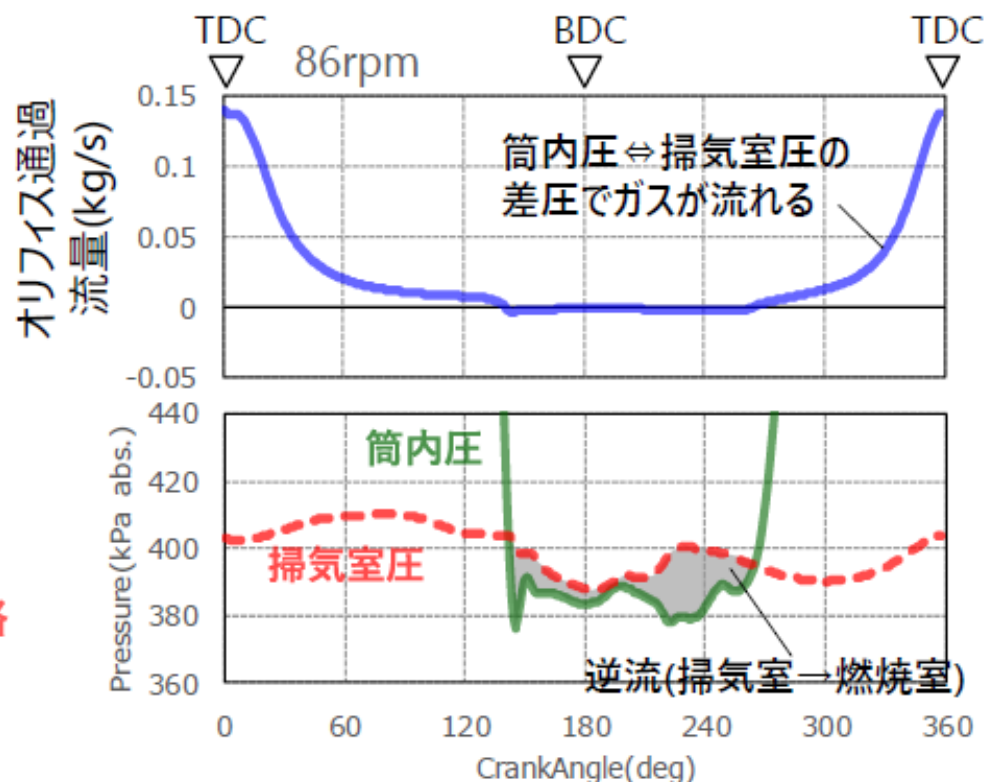
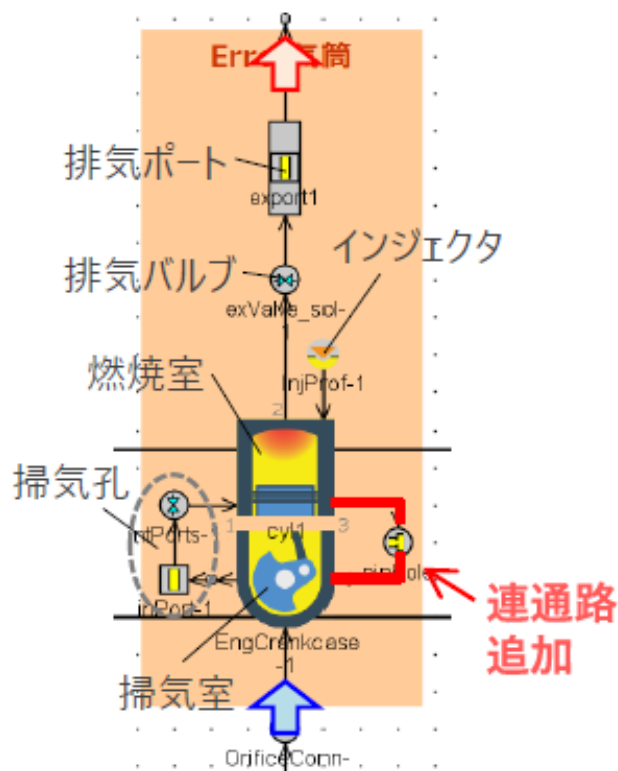
故障シナリオをモデルに実装：故障と特徴量変化を紐付けて原因を診断



主機関1Dシミュレーションによる故障解析

ピストンリング劣化(ブローバイ)をモデル化: **故障の詳細プロセスを分析**

リングからのガス抜けを“シリンダ→掃気室の仮想配管”で再現

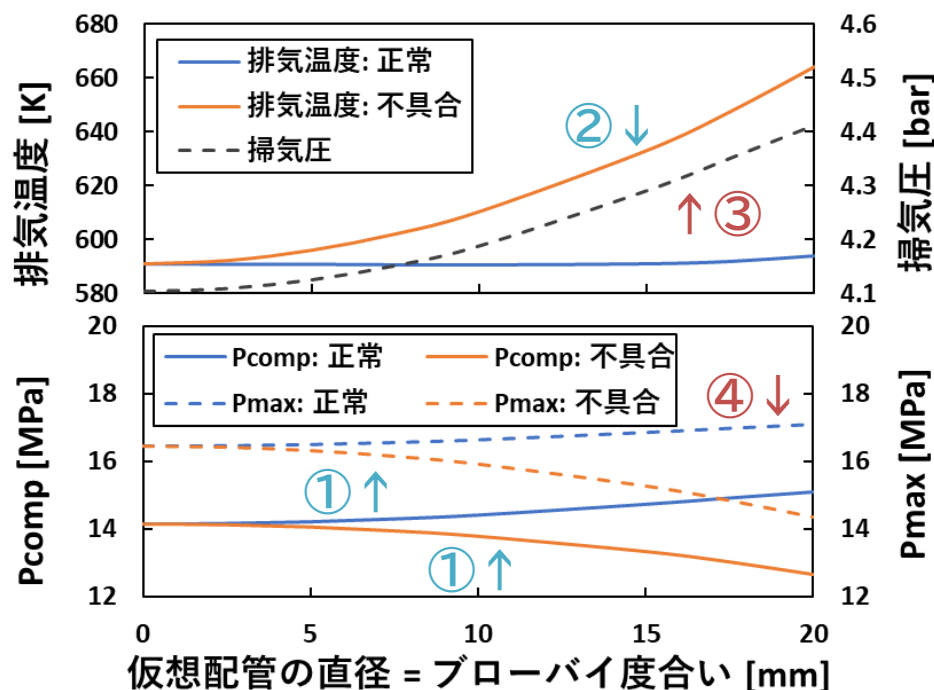


主機関1Dシミュレーションによる故障解析

ピストンリング劣化(ブローバイ)をモデル化: **故障の詳細プロセスを分析**

解析結果 - 80 [min⁻¹] × 10,900 kW

➤ 燃費: 質量2%逆流で168→175 g/kWh



故障プロセス

- ① 不具合シリンダにおける吹き抜けで P_{comp}/max 低下
- ② 不燃性ガス掃気室戻りで燃焼悪化で排気温度増加
- ③ 主機全体での排気温度増加により掃気圧が増加
- ④ 正常シリンダでは掃気圧増加により燃焼改善

目次

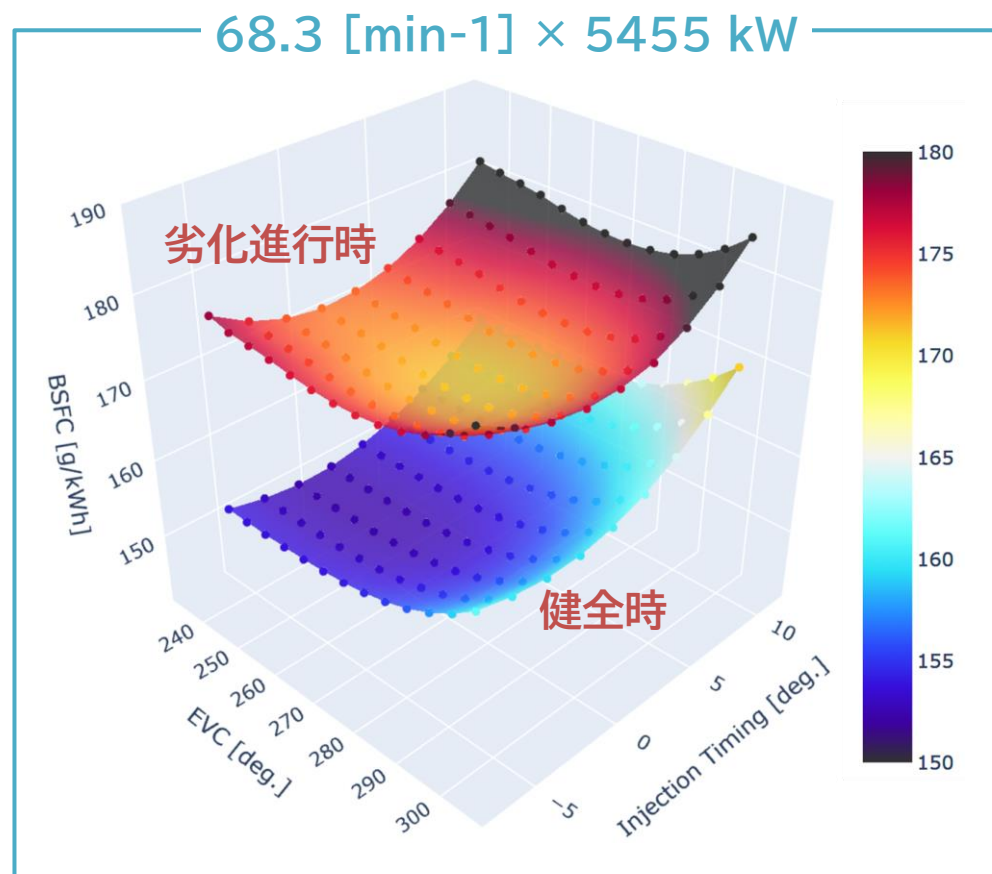
1. 研究背景と目的
2. 主機関1Dシミュレーションの開発
3. シミュレーションによる故障診断
4. 故障(不具合)発生時の再適合評価
5. まとめと今後の課題

故障(不具合)発生時の制御パラメータ再適合

ピストンリング劣化時の応答曲面を解析：不具合に応じて適合条件を調整

不具合発生時の応答曲面

- 同じ動作点でも健全時と比較して**応答曲面の形状が変化する**
 ➡ 出荷時の適合条件は**燃費が最適化されていない可能性**

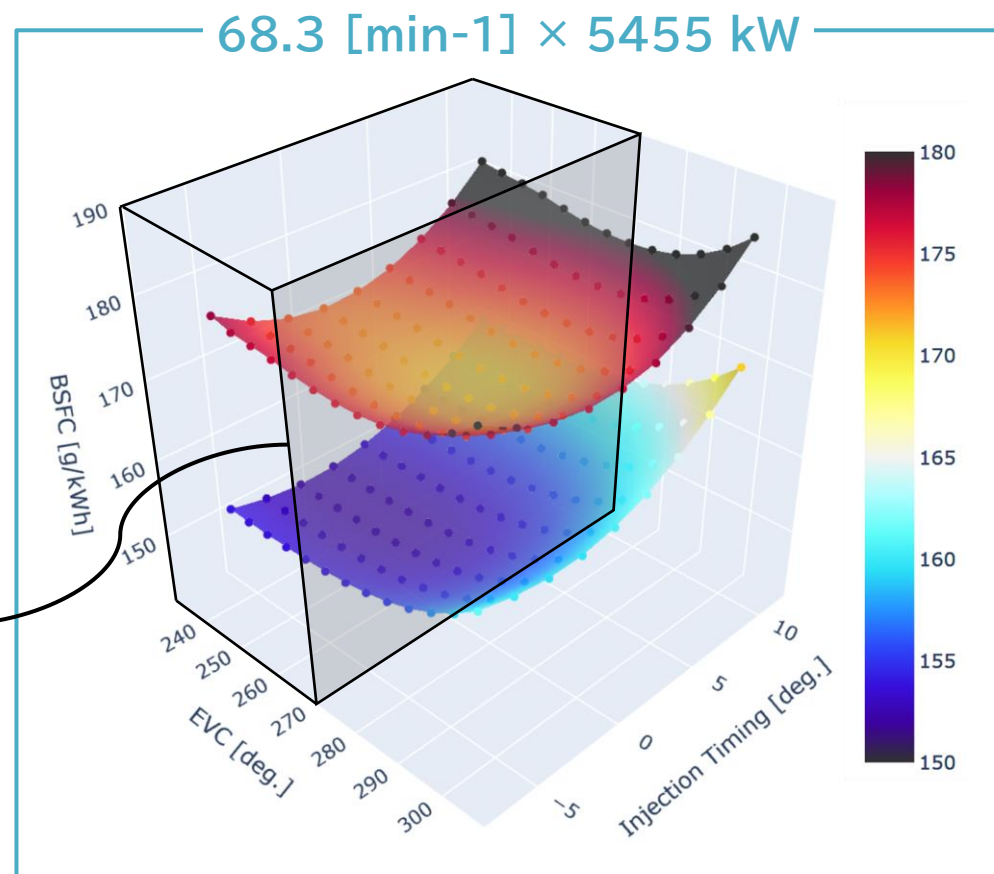
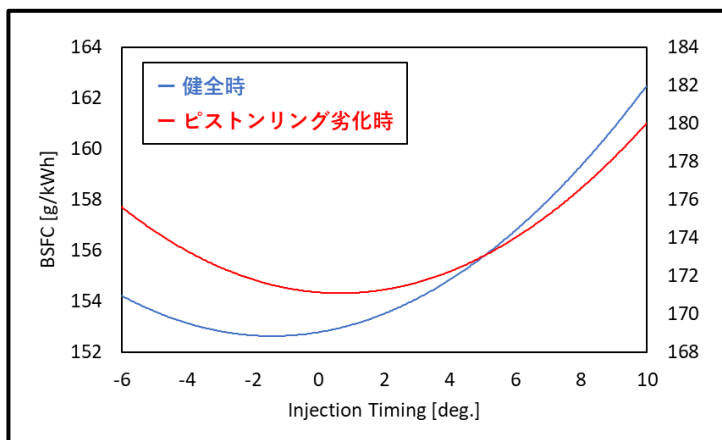


故障(不具合)発生時の制御パラメータ再適合

ピストンリング劣化時の応答曲面を解析: 不具合に応じて適合条件を調整

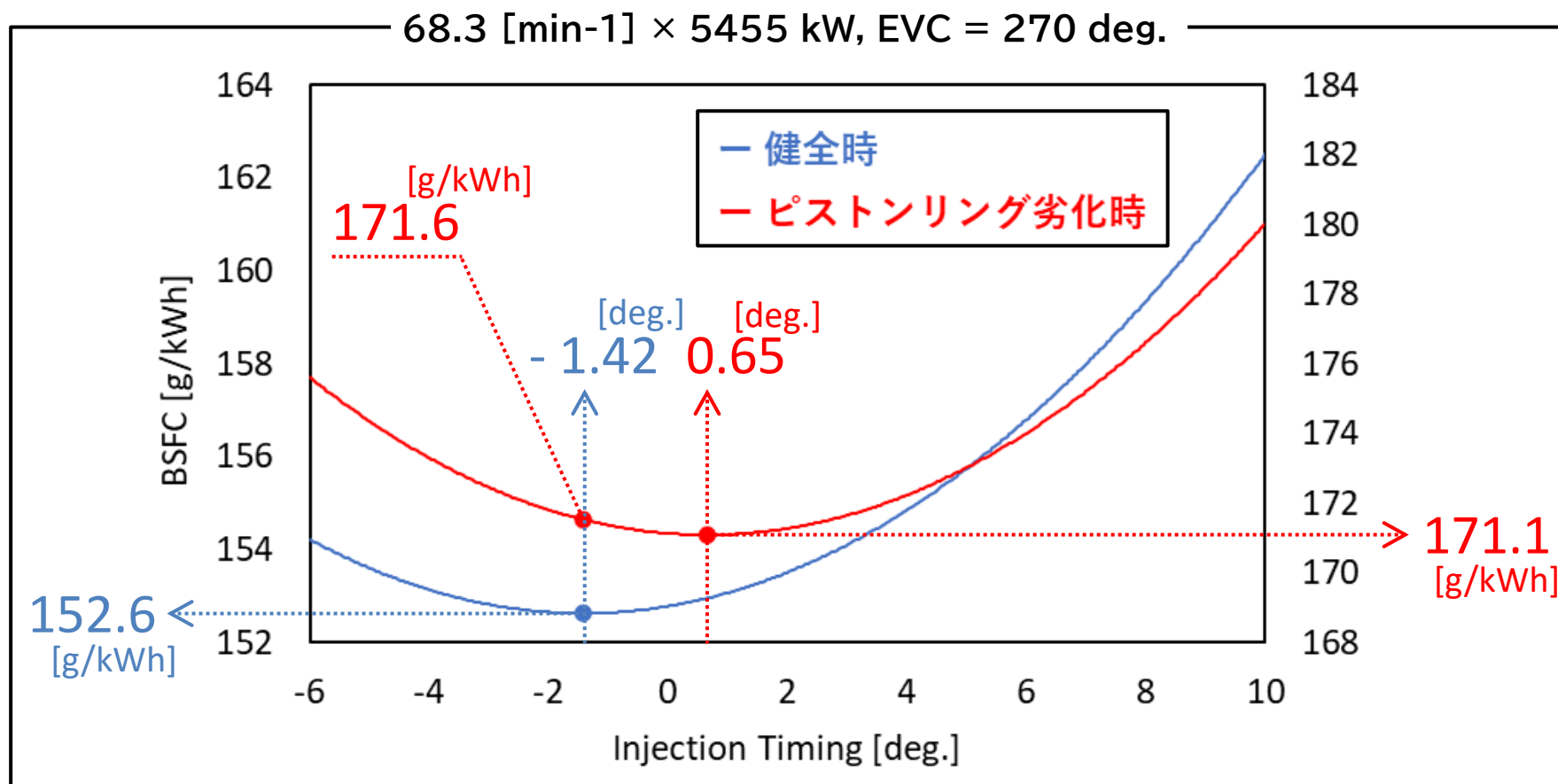
不具合発生時の応答曲面

- 同じ動作点でも健全時と比較して**応答曲面の形状が変化する**
➡ 出荷時の適合条件は**燃費が最適化されていない可能性**



故障(不具合)発生時の制御パラメータ再適合

ピストンリング劣化時の応答曲面を解析：不具合に応じて適合条件を調整



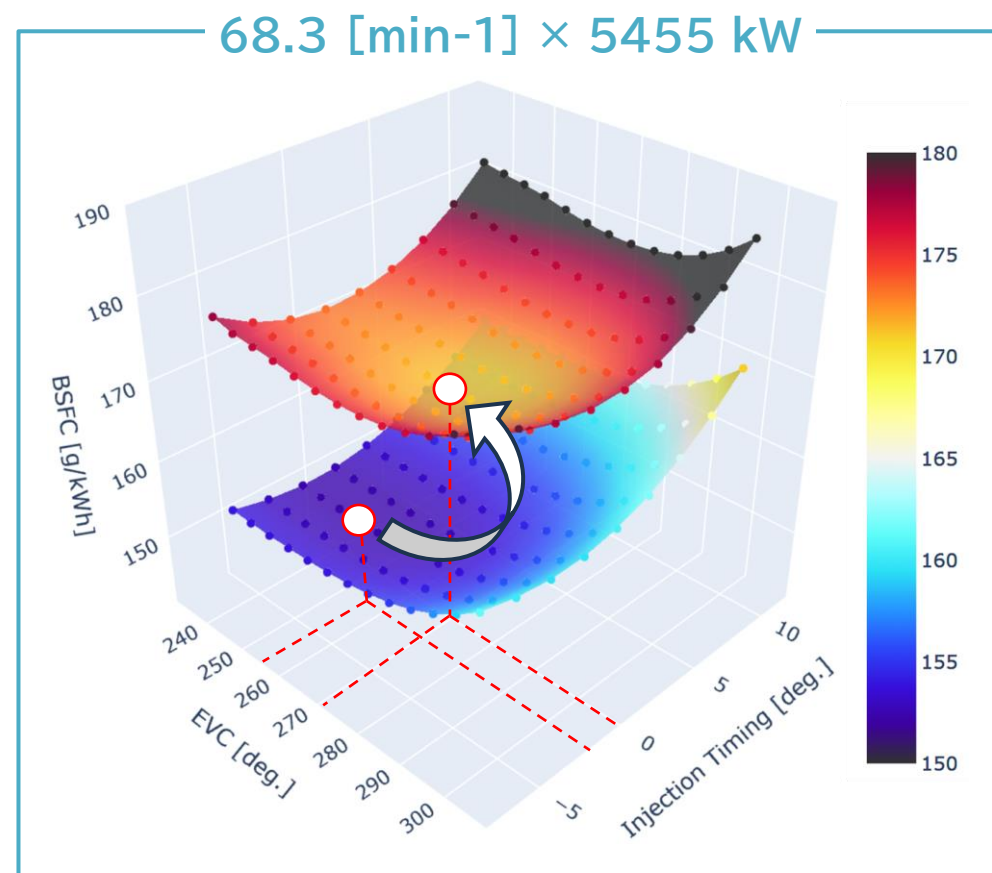
故障(不具合)発生時の制御パラメータ再適合

ピストンリング劣化時の応答曲面を解析: 不具合に応じて適合条件を調整

不具合発生時の応答曲面

- 同じ動作点でも健全時と比較して**応答曲面の形状が変化する**
➡ 出荷時の適合条件は**燃費が最適化されていない可能性**

不具合	EVC [deg.]	Inject. [deg.]	BSFC [g/kWh]
なし	255	-2	152.3
あり	255	-2	172.8
あり	270	0	171.1



故障(不具合)発生時の制御パラメータ再適合

Engine Speed [min-1]	作動条件	EVC [deg.]	inj_time [deg.]	Pmax [bar.]	BSFC [g/kWh]	
68.3 (50%MCR)	正常, 適合済み	255	-2	173.0	152.3	Down V V
	異常, 適合なし			182.3	172.8	
	異常, 適合済み	270	0	153.2	171.1	
78.1 (75%MCR)	正常, 適合済み	260	-4	216.3	151.7	Down V V
	異常, 適合なし			226.1	170.0	
	異常, 適合済み	275	-2	188.8	168.8	
86 (100%MCR)	正常, 適合済み	265	-6	253.9	152.2	Down V V
	異常, 適合なし			269.3	169.1	
	異常, 適合済み	280	-6	240.5	168.2	

- 異常発生後に再適合を実施し、燃費は**0.9~1.7 g/kWh**の取り代あり
- 高負荷における適合点は、**Pmaxの限界値(170 bar.)**を越えてしまう



故障(不具合)発生時の制御パラメータ再適合

Engine Speed [min-1]	作動条件	EVC [deg.]	inj_time [deg.]	Pmax [bar.]	BSFC [g/kWh]	
68.3 (50%MCR)	正常, 適合済み	260	-2	168.4	152.3	Down V V
	異常, 適合なし			176.6	172.3	
	異常, 適合済み	270	0	153.2	171.1	
78.1 (75%MCR)	正常, 適合済み	275	0	168.4	153.3	UP ^ ^
	異常, 適合なし			173.9	169.2	
	異常, 適合済み	280	0	167.5	169.3	
86 (100%MCR)	正常, 適合済み	290	0	168.0	157.3	UP ^ ^
	異常, 適合なし			174.5	171.1	
	異常, 適合済み	295	0	165.8	172.1	

- Pmax=170 bar.で制限した場合、**低負荷でのみ再適合の効果**を確認
- 高負荷側でも**再適合を実施することで、Pmax制限をクリア**できる



目次

1. 研究背景と目的
2. 主機関1Dシミュレーションの開発
3. シミュレーションによる故障診断
4. 故障(不具合)発生時の再適合評価
5. まとめと今後の課題

本研究のまとめ

① 主機関1Dシミュレーションの開発

- ✓ GT Powerによる主機モデルの構築：試験と同等程度の計算が可能
- ✓ 応答曲面法による適合条件：各動作点における最適燃費条件を算出

② シミュレーションを利用した故障解析

- ✓ 故障の再現：ピストンリング劣化のモデル化方法を検討し実装
- ✓ 故障の分析：燃焼ガス戻りの $P_{comp/max}$ 低下と排ガス温度上昇を確認
掃気圧増加による正常シリンダでの P_{max} 増加を確認

③ 故障(不具合)発生時の再適合評価

- ✓ 健全/故障時の性能比較：燃費性能の応答曲面と再適合の余地を確認
- ✓ 性能改善の検討：再適合による燃費改善や運転範囲拡大を実装した
- 主機の故障診断と最適運航活用に向けたパラメータスタディを実施 -

今後の課題

故障解析シミュレーションの精度向上と定量的な制御パラメータの決定

- ✓ 要素試験や実際の故障(劣化)事例と解析結果の比較による結果検証
- ✓ オペレーションプロファイルによるデータ同化を活用し計算精度を向上
- ✓ デジタルツインによる故障度合いの特定と制御ロジックへの落とし込み
- 故障の度合いを診断し状況に応じたパラメータ探索が可能なモデル -

