



パワートレーン先行企画 シミュレーション開発

システム入力列最適化手法の検討

2019.05.28
トヨタ自動車株式会社
パワートレーン先行統括室
先行MBD1Gr.
吉田 庄三



目次

1. 検討の背景と目的
2. 先行企画シミュレーションとその要件
3. 最適化手法
4. 効果検証
5. まとめ



1-1. トヨタの使命

走る楽しさ



安全性・信頼性



良品廉価

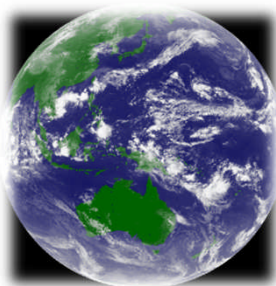


お客様の
笑顔



クリーンな
排気ガス

低燃費



環境性能

利便性・快適性



要求を高レベルで満足し、
お客様の期待を超えるクルマを企画・開発し続ける。



1-2. トヨタをとりまく状況

新技術の登場



人工知能



自動運転



コネクティッドカー



予防安全技術

新規参入者の登場



TOYOTA

クルマの所有・使用形態変化

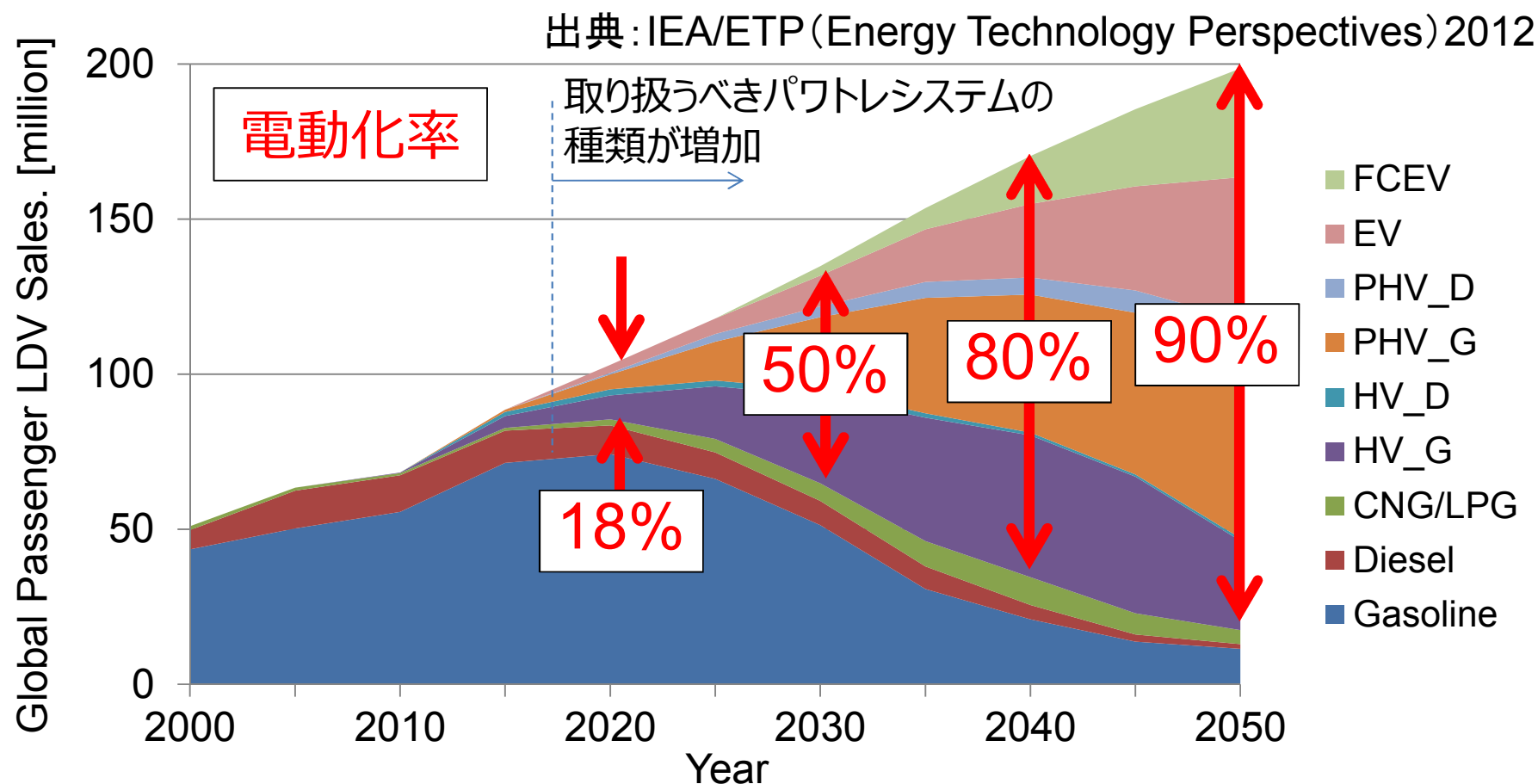


カーシェアリング

100年に1度の大変革期



1-3. 先行パワトレ開発をとりまく状況



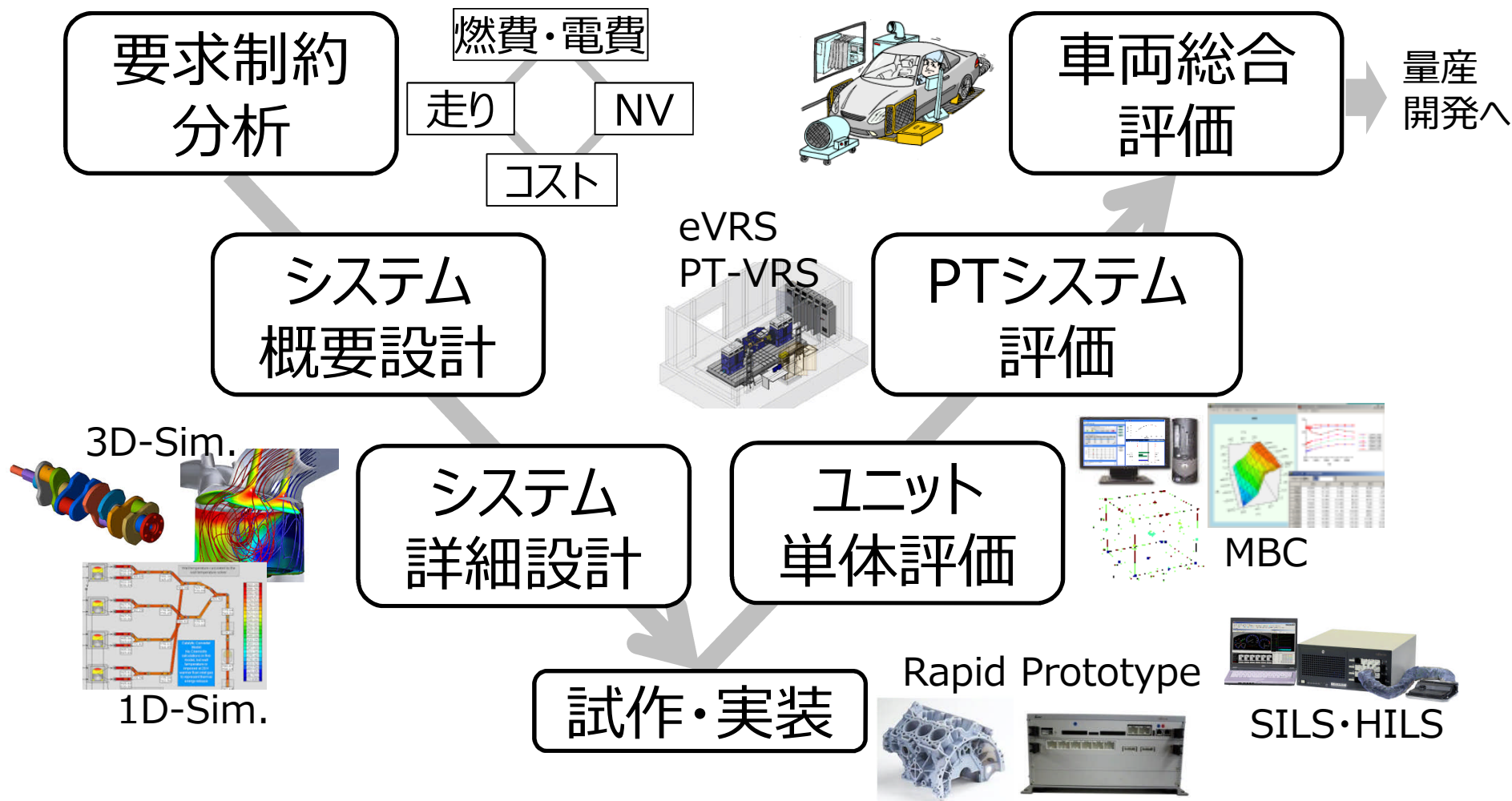
電動化が進むと同時にパワトレシステム構成が多様化
先行企画段階での正確な将来パワトレ予測の必要性が高まる



目次

1. 検討の背景と目的
2. 先行企画シミュレーションとその要件
3. 最適化手法
4. 効果検証
5. まとめ

2-1. 先行パワトレ開発プロセスとシミュレーション



プロセスの各所でMBDを実施中

2-1. 先行パワトレ開発プロセスとシミュレーション



プロセス最上流の企画にもシミュレーションを活用
→最終商品を意識した有望な将来パワトレ提案



2-2. 企画シミュレーションの狙いと要件

狙い：新概念の創造と具現化

- ①検討対象のシステムを客観的(公正)に優劣比較.
- ②システムの最適な動作方法を算出

要件

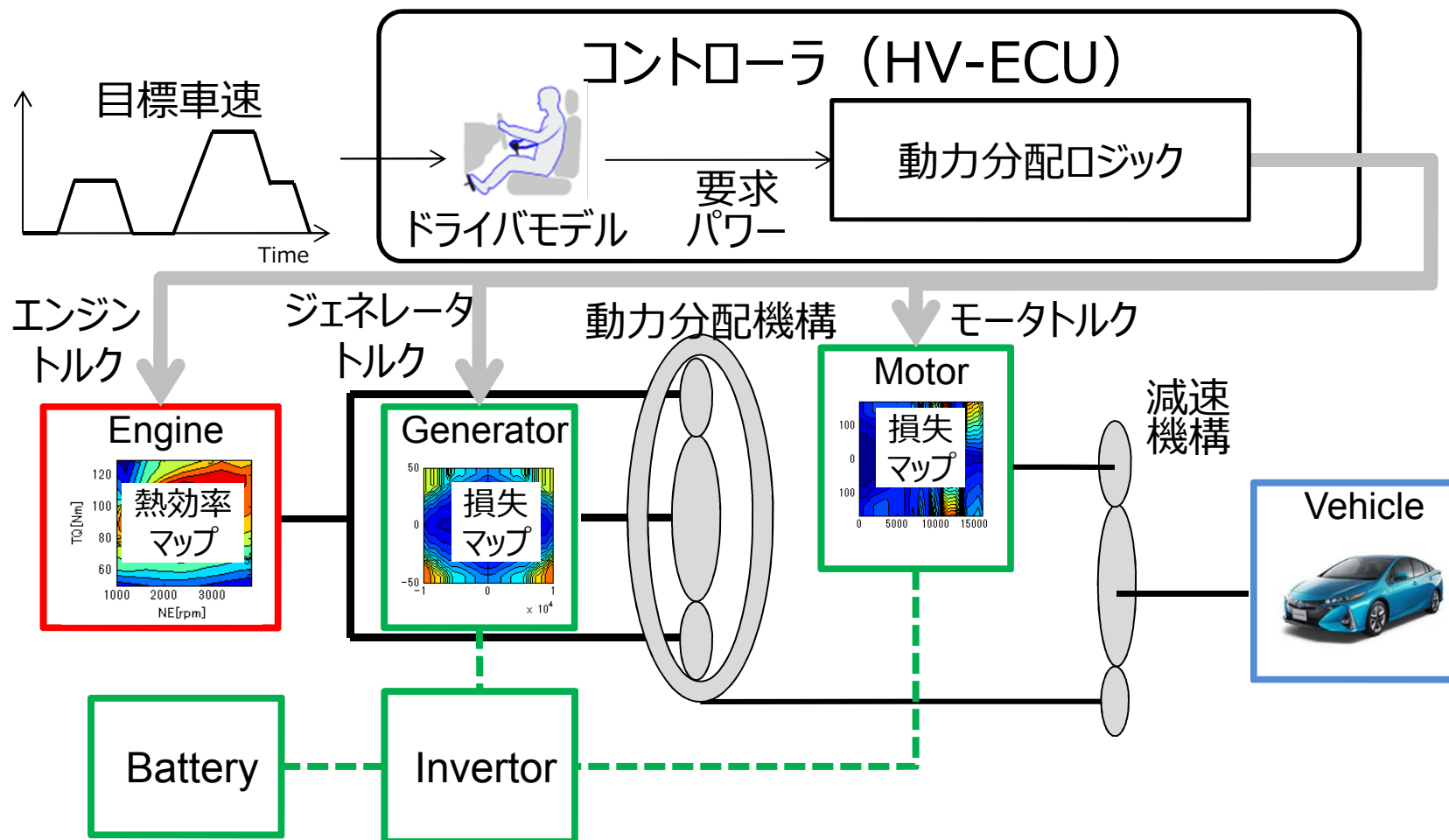
- ①短期間で多数のシステムを比較したい.
- ②下流工程のツールとの整合性を確保したい.



制御ロジック検討を短期間化するため、
手早く最適動作を導く計算手法を採用



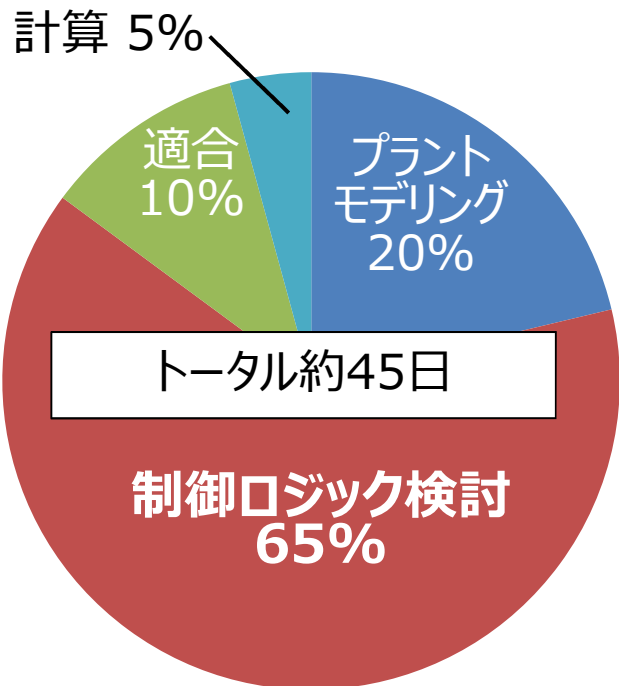
2-3. 既存シミュレーションの構成



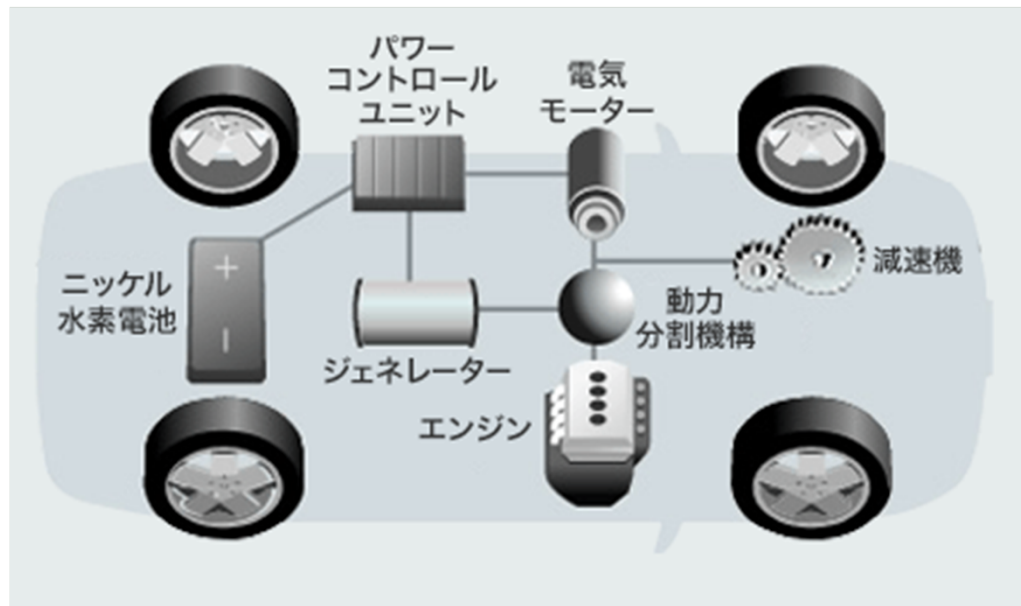
社内で広く利用されるHVシステム用燃費シミュレーション(Matlab[®] and Simulink[®])をベースに構築。
⇒下流工程との整合性確保。



2-3. 既存シミュレーションの構成



シミュレーション工数シェア

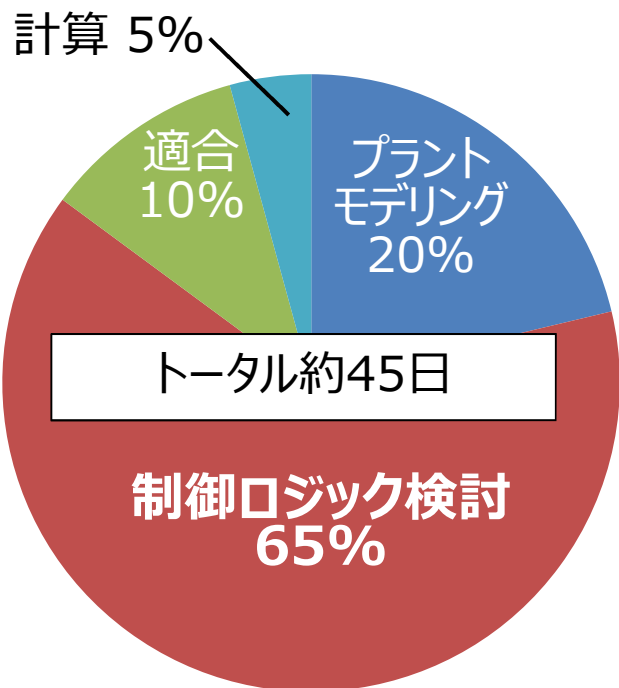


停止時

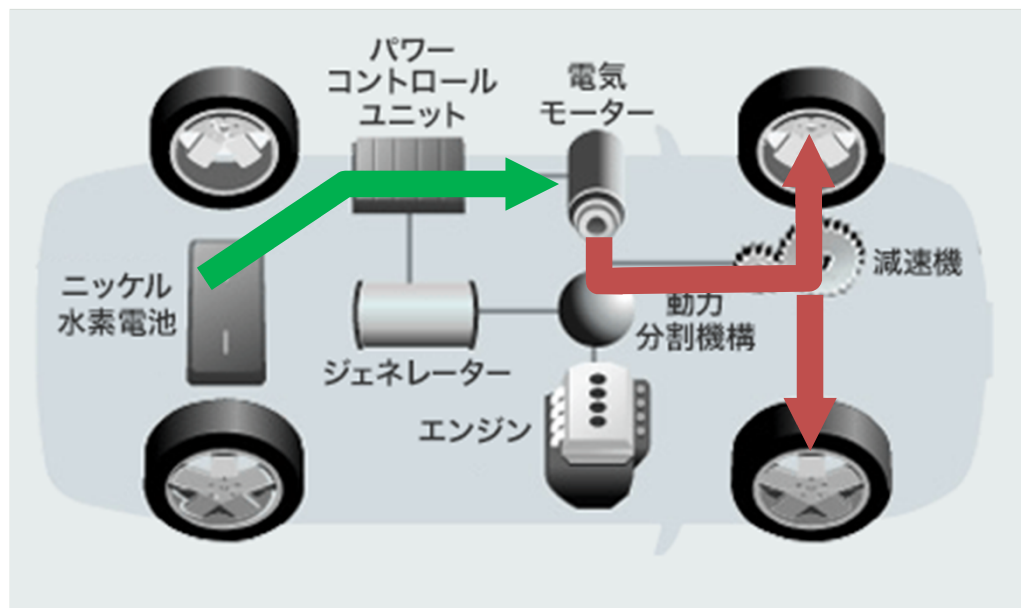
制御が複雑なため、ロジック構築に時間を要する



2-3. 既存シミュレーションの構成



シミュレーション工数シェア

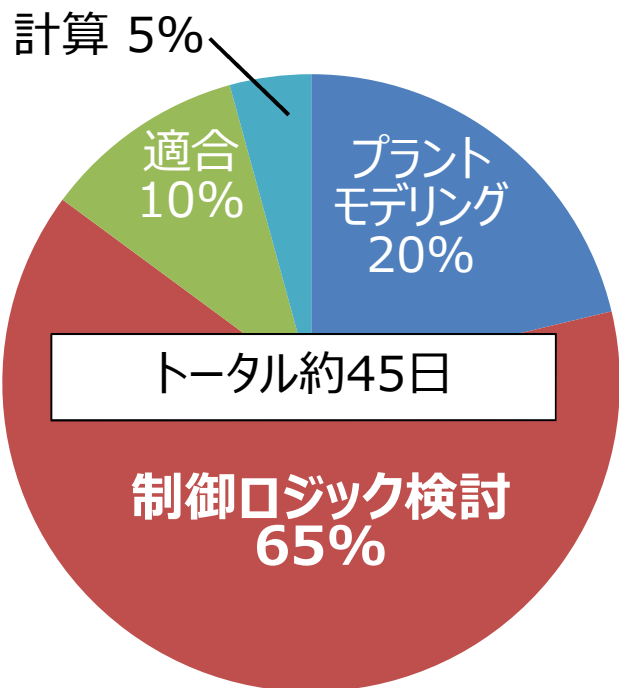


発進・低速走行時

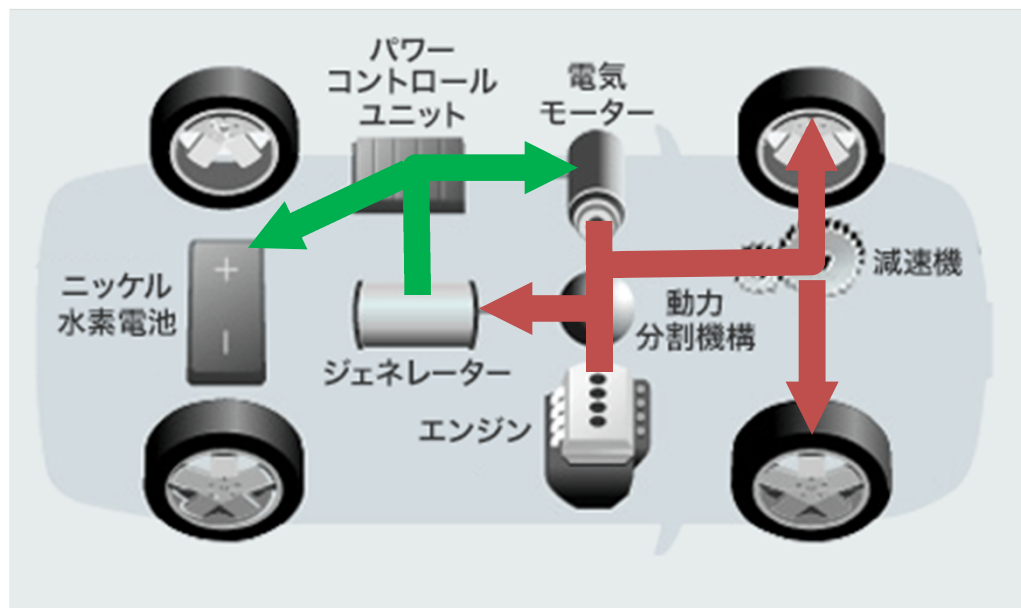
制御が複雑なため、ロジック構築に時間を要する



2-3. 既存シミュレーションの構成



シミュレーション工数シェア

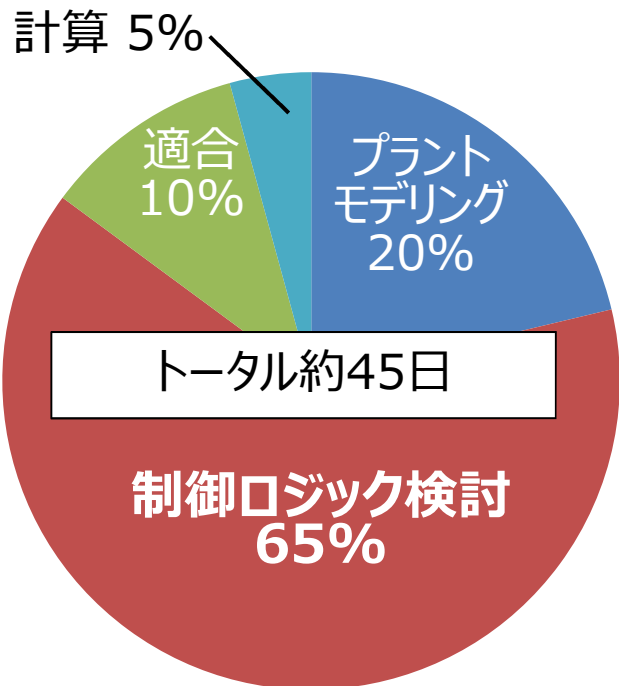


通常走行時

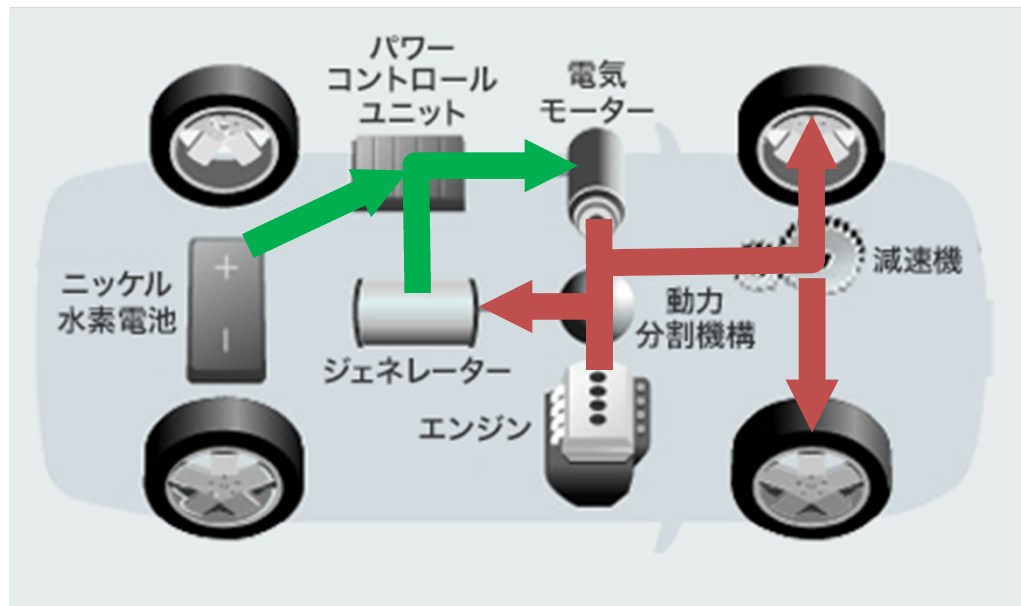
制御が複雑なため、ロジック構築に時間を要する



2-3. 既存シミュレーションの構成



シミュレーション工数シェア

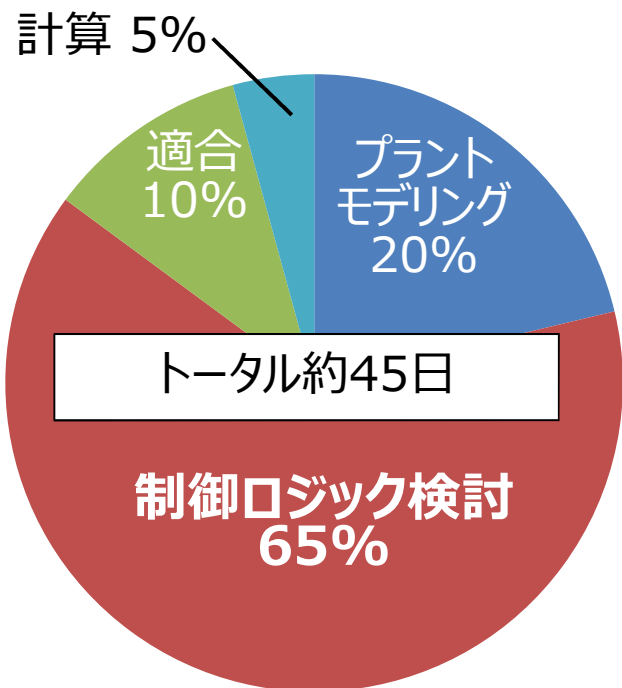


加速時

制御が複雑なため、ロジック構築に時間を要する

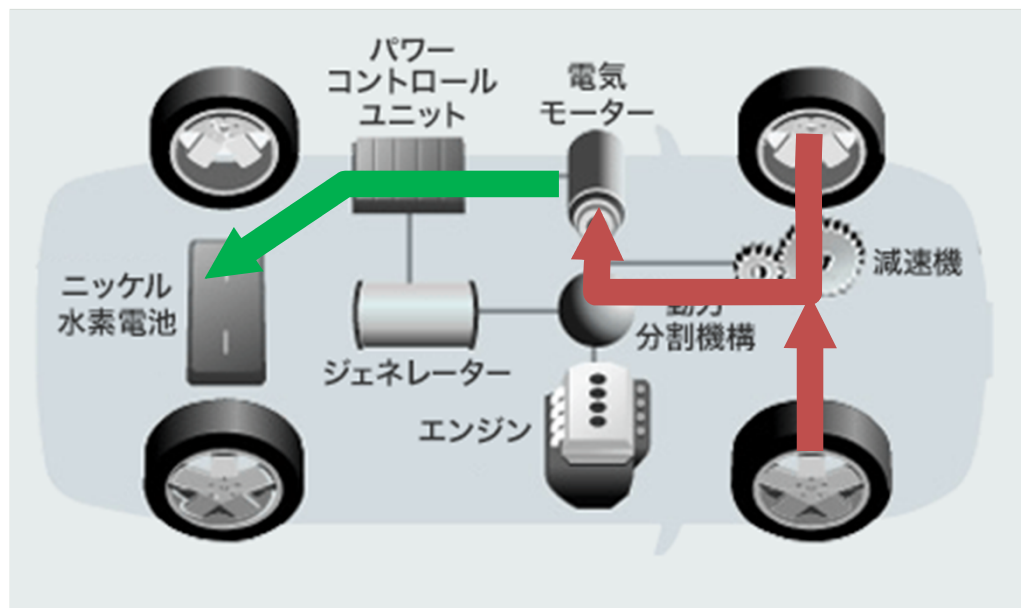


2-3. 既存シミュレーションの構成

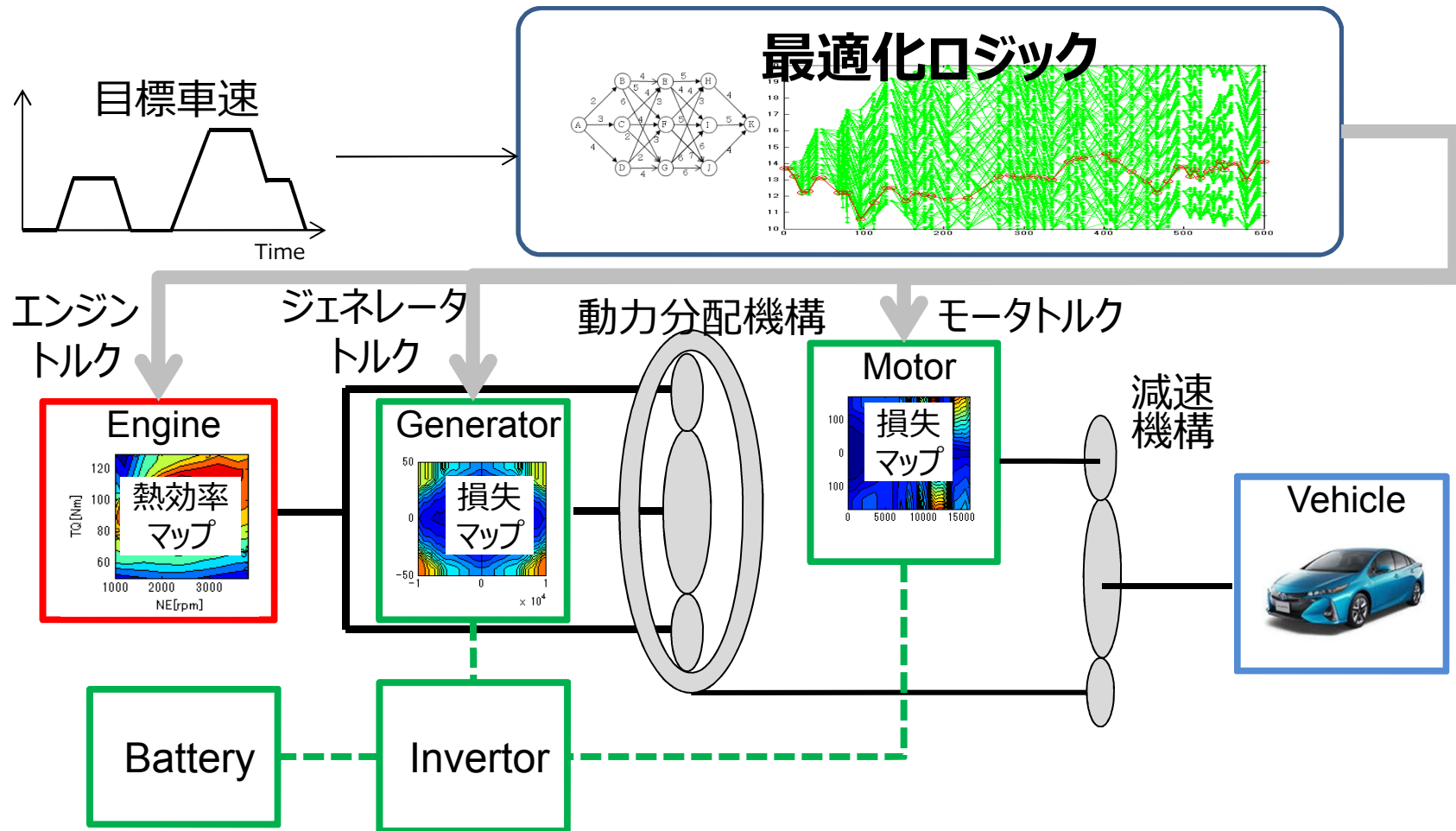


シミュレーション工数シェア

制御が複雑なため、ロジック構築に時間を要する



2-4. シミュレーションの構成



動力分配をルールベースから最適化手法(本開発)に置換
 ⇒制御検討・適合無しで燃費ポテンシャルを引出す



目次

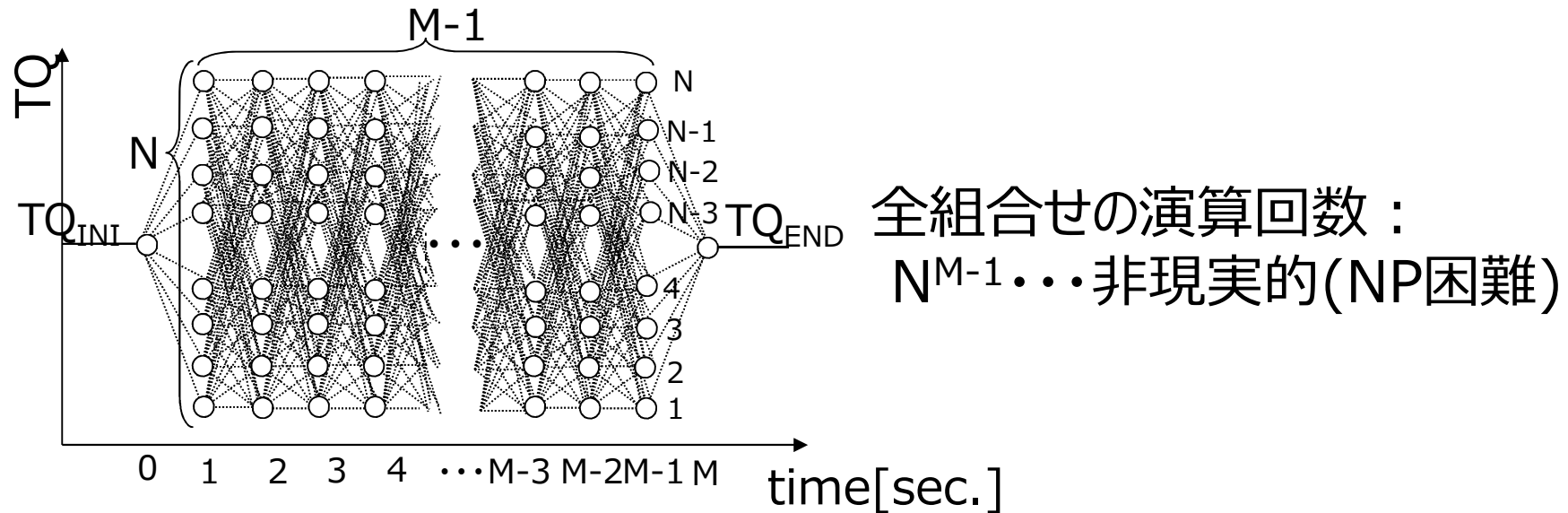
1. 検討の背景と目的
2. 先行企画シミュレーションとその要件
- 3. 最適化手法**
4. 効果検証
5. まとめ



3-1. 最適化のロジック

基本的な考え方：

想定される全トルク組合せで走行後，走行条件を満足したもののの中から燃費最小だったものを選択．



アプローチ①

最適化精度を落とさない範囲で演算回数を低減する手法を検討

アプローチ②

1回あたりの演算時間の短縮を検討． w/MathWorks



3-2. 最適化演算回数の低減 入力組合せ数低減

入力の組合せ数の削減

ある時刻における入力値の組合せ総数： 10^6 オーダ

(エンジン・モータ・ジェネレータトルク各100水準と仮定)



モード走行燃費を最適化(最小化)することを前提に、
最適化対象システムの知見を織り込むことで、
入力の探索範囲を絞り込み、組合せ数を減らせないか？



最適化入力を変更：

トルクの組合せ ⇒ 予め複数設定したシステムの動作モード

総数： $\sim 10^6$

総数：28



3-3. 最適化演算回数の低減 入力組合せ数低減

システムの動作モード設定 (28モード)

	コンポーネント動作モード	エンジントルク	モータトルク	ジェネレータトルク
1	停止	0	0	0
2	モータ or ジェネレータ 単体駆動		0	車速追従
3			車速追従	0
4			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)	
5	モータ・ジェネレータ 両方駆動		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)	
6			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)	
7			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)	
8			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)	
9			車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)	
10			車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)	
11			車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)	
12			車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)	
13			車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)	
14		エンジン + (モータ or ジェネレータ)	0	車速追従
15			車速追従	0
16	エンジン + モータ + ジェネレータ	最大効率発生 トルク	車速追従 + エンジン回転数保持(2000rpm)	
17			車速追従 + エンジン回転数保持(2500rpm)	
18			車速追従 + エンジン回転数保持(3000rpm)	
19			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)	
20			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)	
21			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)	
22			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)	
23			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)	
24			車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)	
25			車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)	
26			車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)	
27			車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)	
28			車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)	



3-3. 最適化演算回数の低減 入力組合せ数低減

システムの動作モード設定 (28モード)

	コンポーネント動作モード	エンジントルク	モータトルク	ジェネレータトルク
1	停止	0	0	0
2	モータ or ジェネレータ 単体駆動		0	車速追従
3			車速追従	0
4			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)	
5	モータ・ジェネレータ 両方駆動		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)	
6			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)	
7			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)	
8			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)	
9			車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)	
10			車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)	
11			車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)	
12			車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)	
13			車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)	
14		エンジン + (モータ or ジェネレータ)	0	車速追従
15	車速追従		0	
16	エンジン + モータ + ジェネレータ	最大効率発生 トルク	車速追従 + エンジン回転数保持(2000rpm)	
17			車速追従 + エンジン回転数保持(2500rpm)	
18			車速追従 + エンジン回転数保持(3000rpm)	
19			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)	
20			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)	
21			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)	
22			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)	
23			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)	
24			車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)	
25			車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)	
26			車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)	
27			車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)	
28			車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)	

① 全ての動作モードを網羅



3-3. 最適化演算回数の低減 入力組合せ数低減

システムの動作モード設定 (28モード)

	コンポーネント動作モード	エンジントルク	モータトルク	ジェネレータトルク
1	停止	0	0	0
2	モータ or ジェネレータ 単体駆動		0	車速追従
3			車速追従	0
4			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)	
5	車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)			
6	車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)			
7	車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)			
8	EV モータ・ジェネレータ 両方駆動		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)	
9			車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)	
		車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)		
		車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)		
		車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)		
		車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)		
		0	車速追従	
		車速追従	0	
22	モータ + ジェネレータ	車速追従 + エンジン回転数保持(2000rpm)		
23		車速追従 + エンジン回転数保持(2500rpm)		
24		車速追従 + エンジン回転数保持(3000rpm)		
25		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)		
26		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)		
27		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)		
28		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)		
		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)		
	車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)			
	車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)			
	車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)			
	車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)			
	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			

②モード車速に追従できる

- ・エンジン
- ・モータ
- ・ジェネレータ

トルクの組合せに限定する



3-3. 最適化演算回数の低減 入力組合せ数低減

システムの動作モード設定 (28モード)

	コンポーネント動作モード	エンジントルク	モータトルク	ジェネレータトルク
1	停止	0	0	0
2	モータ or ジェネレータ 単体駆動		0	車速追従
3			車速追従	0
4			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)	
5	モータ・ジェネレータ 両方駆動		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)	
6			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)	
7			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)	
8			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)	
9			車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)	
10			車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)	
11			車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)	
12			車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)	
13			車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)	
14		エンジン + モータ + ジェネレータ	最大効率発生 トルク	車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)
15				車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)
16				車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)
17				車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)
18				車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)
19	車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)			
20	車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)			
21	車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)			
22	車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)			
23	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			
24	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			
25	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			
26	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			
27	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			
28	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			

③エンジントルクの候補は、各回転数の最大効率発生点のトルクに限定



3-3. 最適化演算回数の低減 入力組合せ数低減

システムの動作モード設定 (28モード)

	コンポーネント動作モード	エンジントルク	モータトルク	ジェネレータトルク
1	停止	0	0	0
2	モータ or ジェネレータ 単体駆動		0	車速追従
3			車速追従	0
4			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)	
5	モータ・ジェネレータ 両方駆動		車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)	
6			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)	
7			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)	
8			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)	
9			車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)	
10			車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)	
11			車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)	
12			車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)	
13	エンジン + モータ + ジェネレータ	最大効率発生 トルク	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)	車速追従
14			車速追従	0
15			車速追従 + エンジン回転数保持(2000rpm)	
16			車速追従 + エンジン回転数保持(2500rpm)	
17			車速追従 + エンジン回転数保持(3000rpm)	
18			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-6000rpm)	
19			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(-3000rpm)	
20			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(0rpm)	
21			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(3000rpm)	
22			車速追従 + ジェネレータ回転数保持(6000rpm)	
23			車速追従 + モータ回転数保持(-6000rpm)	
24			車速追従 + モータ回転数保持(-3000rpm)	
25	車速追従 + モータ回転数保持(0rpm)			
26	車速追従 + モータ回転数保持(3000rpm)			
27	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			
28	車速追従 + モータ回転数保持(6000rpm)			

**④ 各コンポーネントの回転数を
常用域で3~5水準に限定**



3-4. 最適化演算回数の低減 入力選択回数低減

入力の選択回数(時間の分割数)を削減

時間の離散化：等間隔（1sec.） → 不等間隔（加減速の切替りと同期）

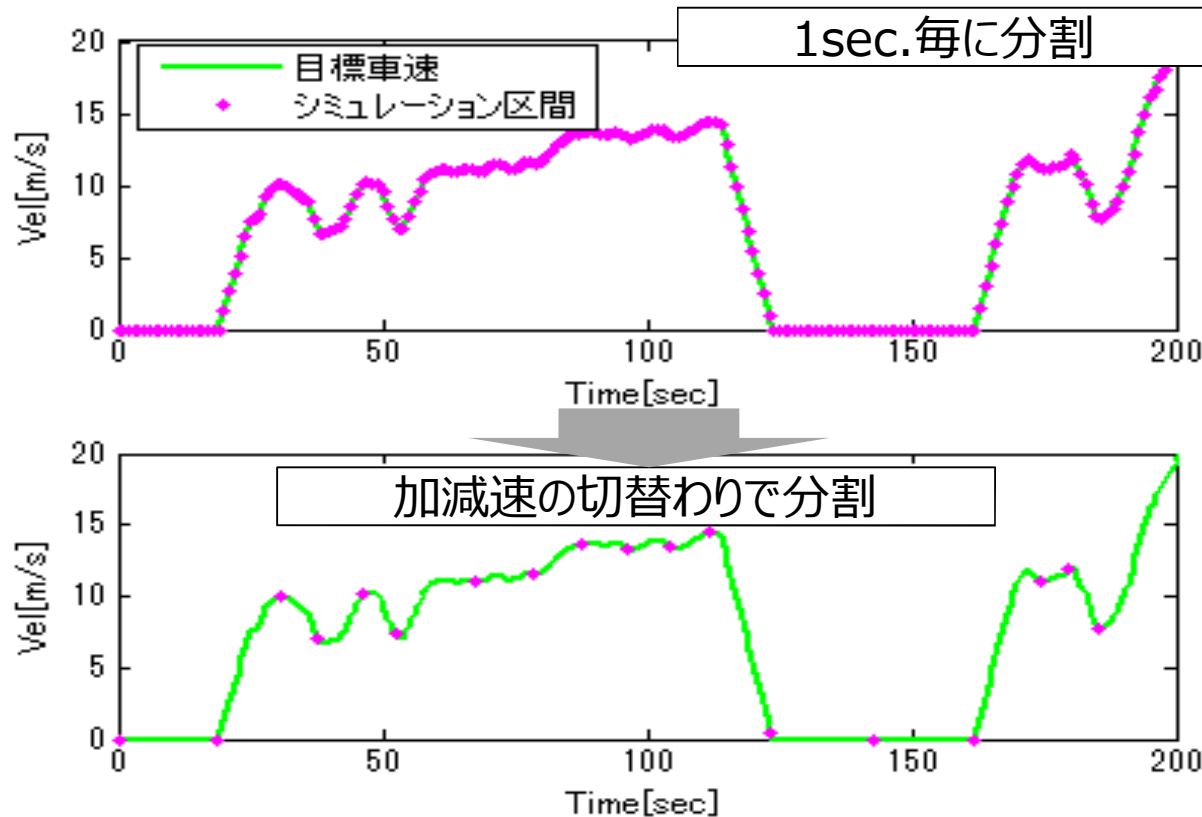


図. シミュレーション時間区分 (LA 4 の例)

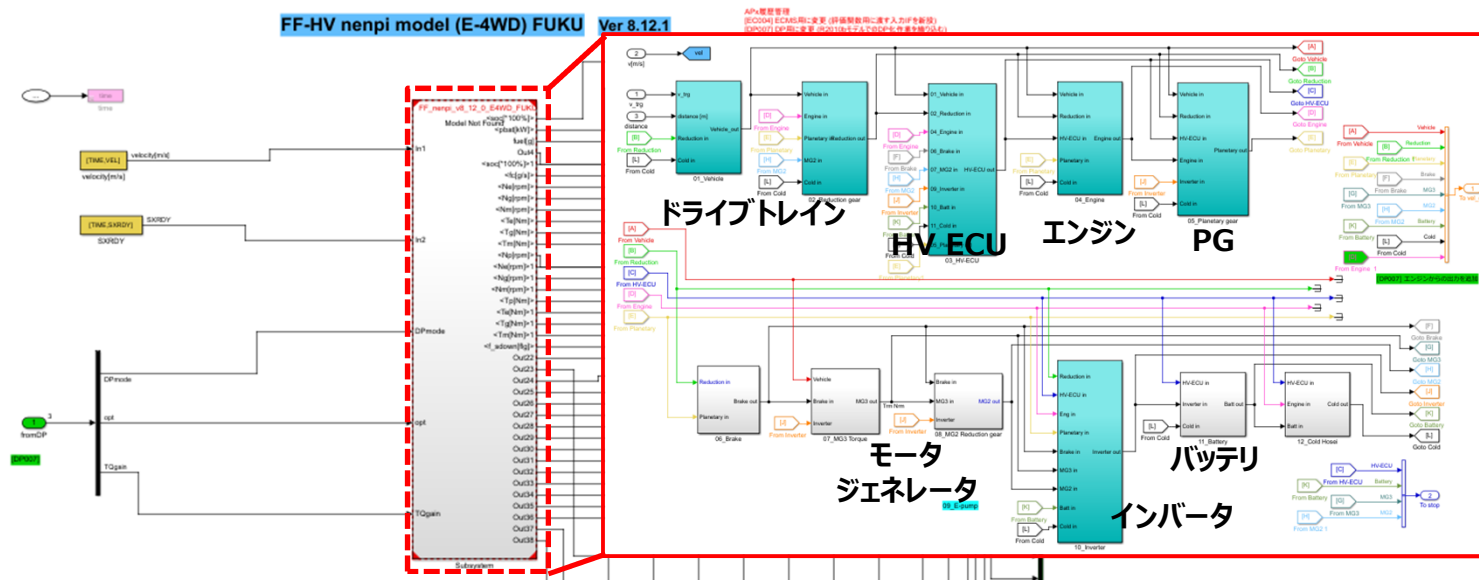
入力組合せ数低減と合せ,許容できる計算時間になった(約13[hr.]@₂₅FTP)



3-5. 演算時間の短縮

・プラントモデル(Simulink)の高速化

ModelReferenceによりプラントモデルの大部分を機械語化 ⇒ 計算時間 1/6



・最適化計算(Matlab Mスクリプト)の高速化

最適化計算処理の効率化: Forループ処理のベクトル化など

変数保存の高速化: save_v6オプションの利用

プログラミングの冗長な処理を削除: 最適化計算中の保存変数の厳選など

⇒計算時間
1/5

オリジナルプログラムからトータル1/30に計算時間を圧縮

1. 検討の背景と目的
2. 先行企画シミュレーションとその要件
3. 最適化手法
4. 効果検証
5. まとめ



4-1. 検証の進め方

- ① モード燃費の最適化ができているかを確認
(量産走行との比較)

- ② ユニット特性 (エンジン) 違いへの適用性を確認

- ③ 異なるシステム間 (シリーズ・パワースプリット) で燃費と電費の優劣を比較



4-2. ①モード燃費最適化

・最適化手法で算出されるモード燃費最適運転条件が実制御と一致しているか？を検証.

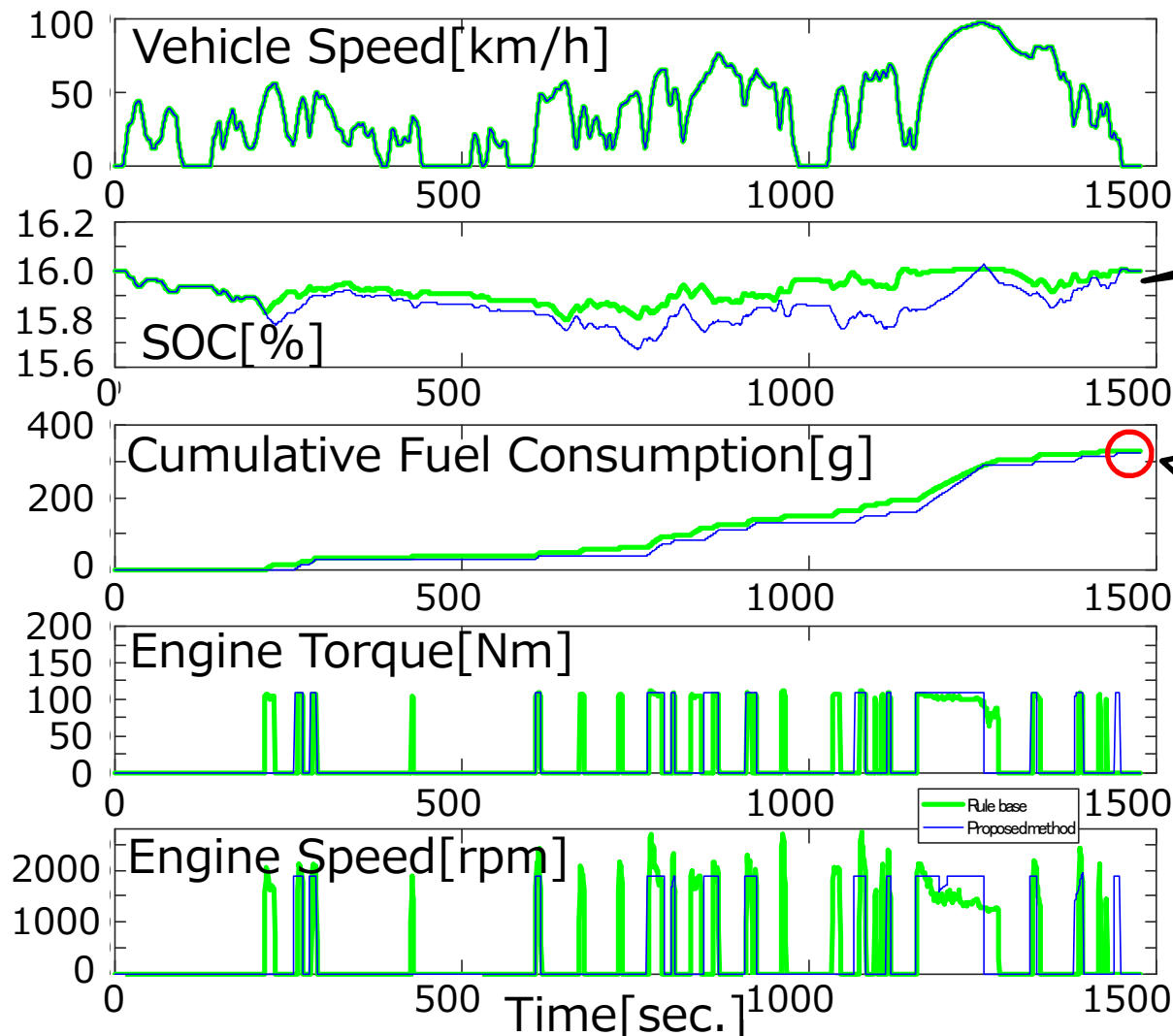
・検証条件：

項目	設定内容
システム構成	THS (Prius PHV)
走行モード	WLTC



4-3. ①モード燃費最適化

— Optimization Method — Rule-based Controller



1. 前半EV多用,
後半充電の挙動は両者
共通

2. 最適化したトータル
燃費は実制御のものより
0.5%良好

3. エンジンOn/Off
タイミングと動作点が類似

本最適化結果と実制御のエンジン・電力の使い方はよく一致。
最適化精度は良好。

30



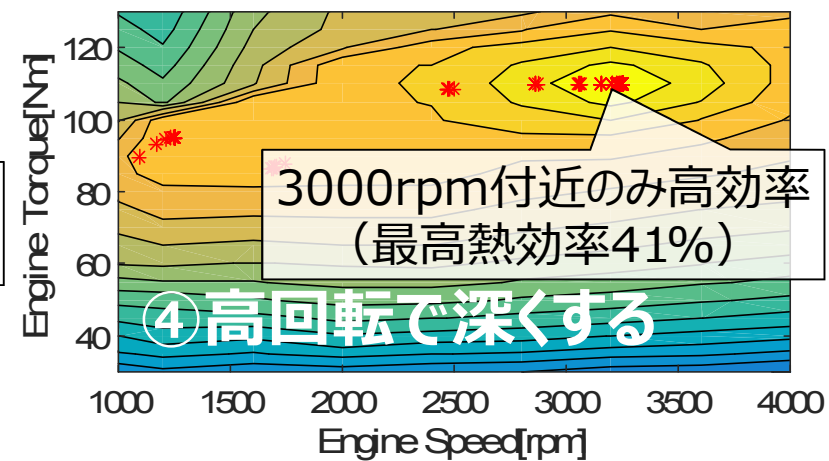
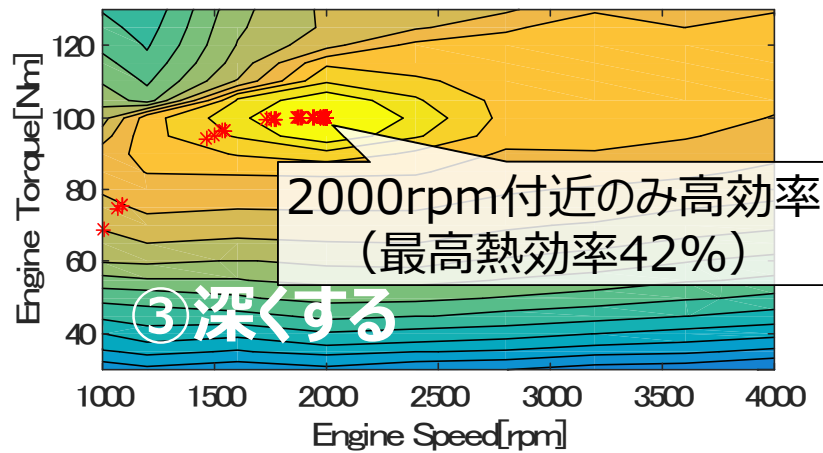
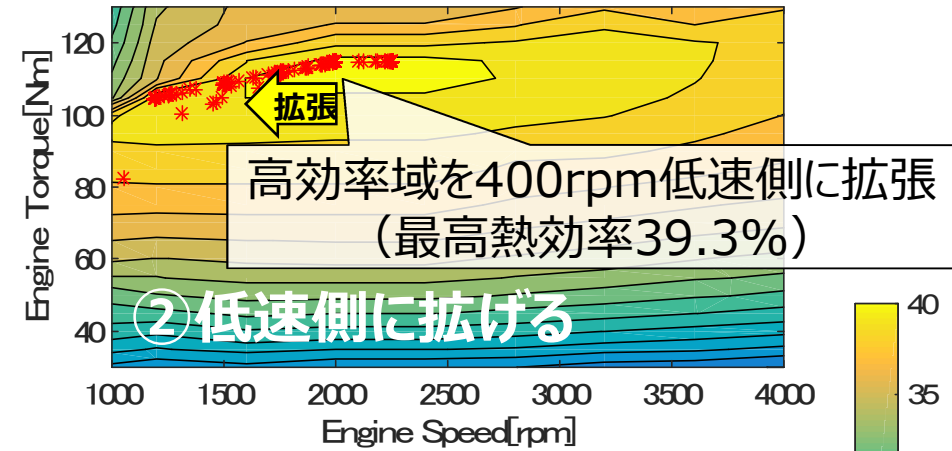
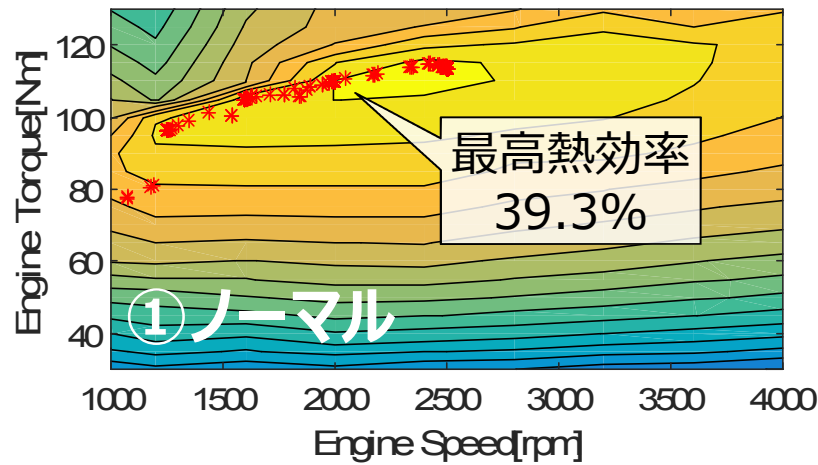
4-4. ②「特性の違い」への適応性

・エンジン効率の特性違いを正しく捉えて運転条件を最適化できるか？を検証.

・計算条件：

項目	設定内容
システム構成	THS(Prius PHV)
走行モード	UDC1回 + EUDC1回
エンジン 効率特性	①ノーマル ②最高効率域を低速側に拡張 ③効率の頂点を高く(深く)変更 ④効率の頂点を高速側で高く(深く)変更

4-5. ②「特性の違い」への適応性

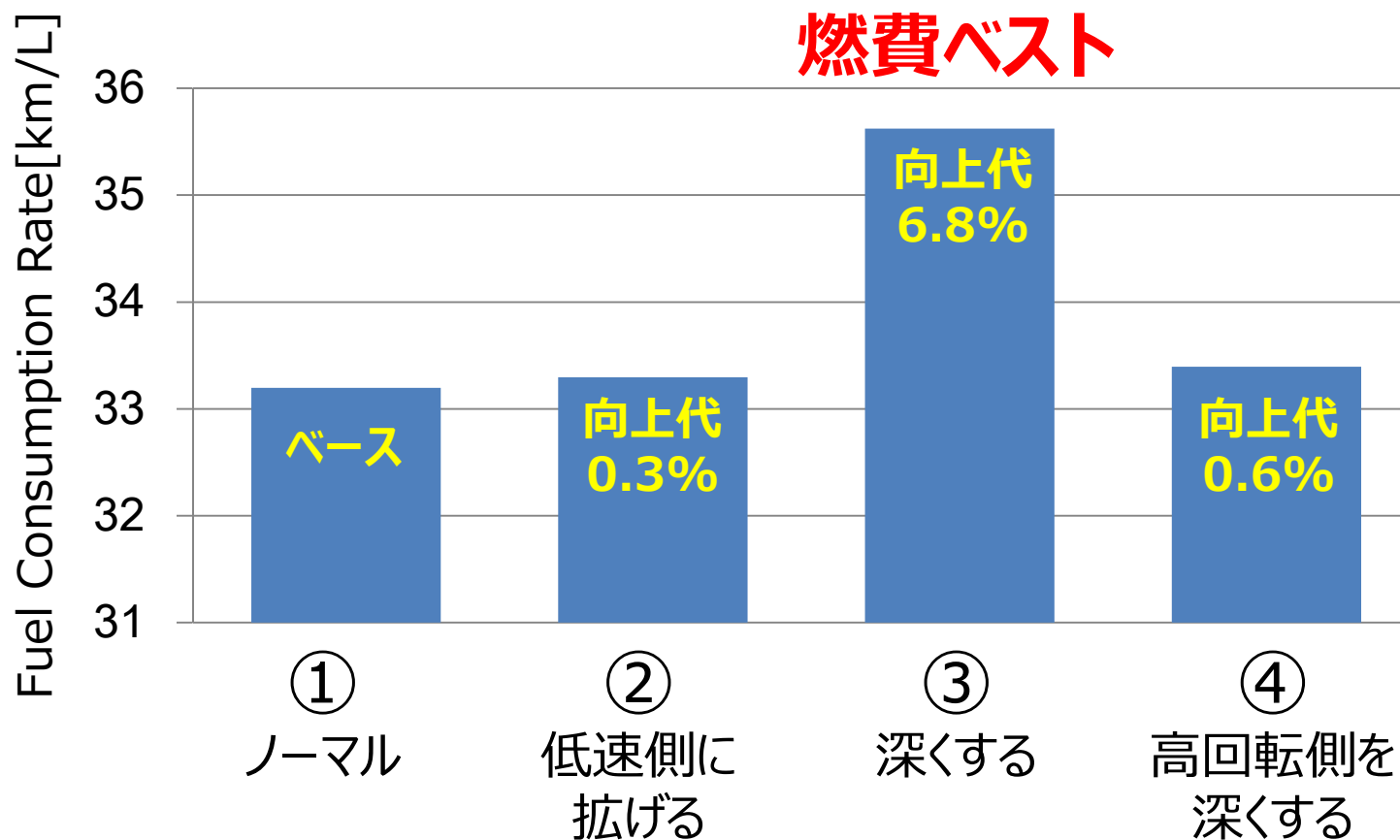


エンジン特性に合わせて動作点を自動調整可能

特性マップの入換えのみ(キャリブレーション無し)で燃費評価が可能。



4-6. ②「特性違い」への適用性



最高効率点を深くしたマップが燃費ベスト
⇒エンジン開発の方向性を示唆することが可能

4-7. ③燃費・電費のシステム間比較

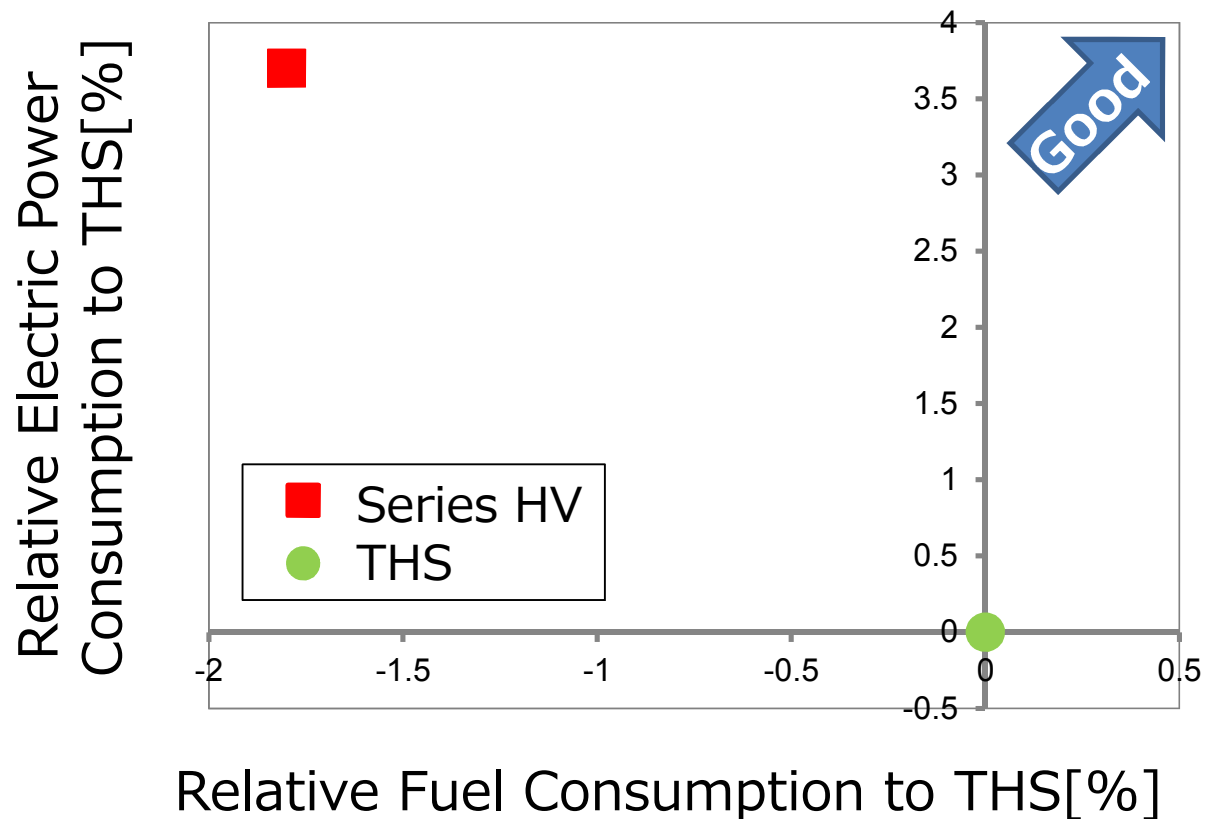
検証条件：

	シリーズHV	THS
構成		
Eng.	98kW	←
MG1	85kW (エンジン出力を受け切れる最小出力)	40kW
MG2	55kW	←
モード	WLTC	

シリーズ型HVを未知（制御ロジックが存在しない）新システムと想定.



4-8. ③燃費・電費のシステム間比較

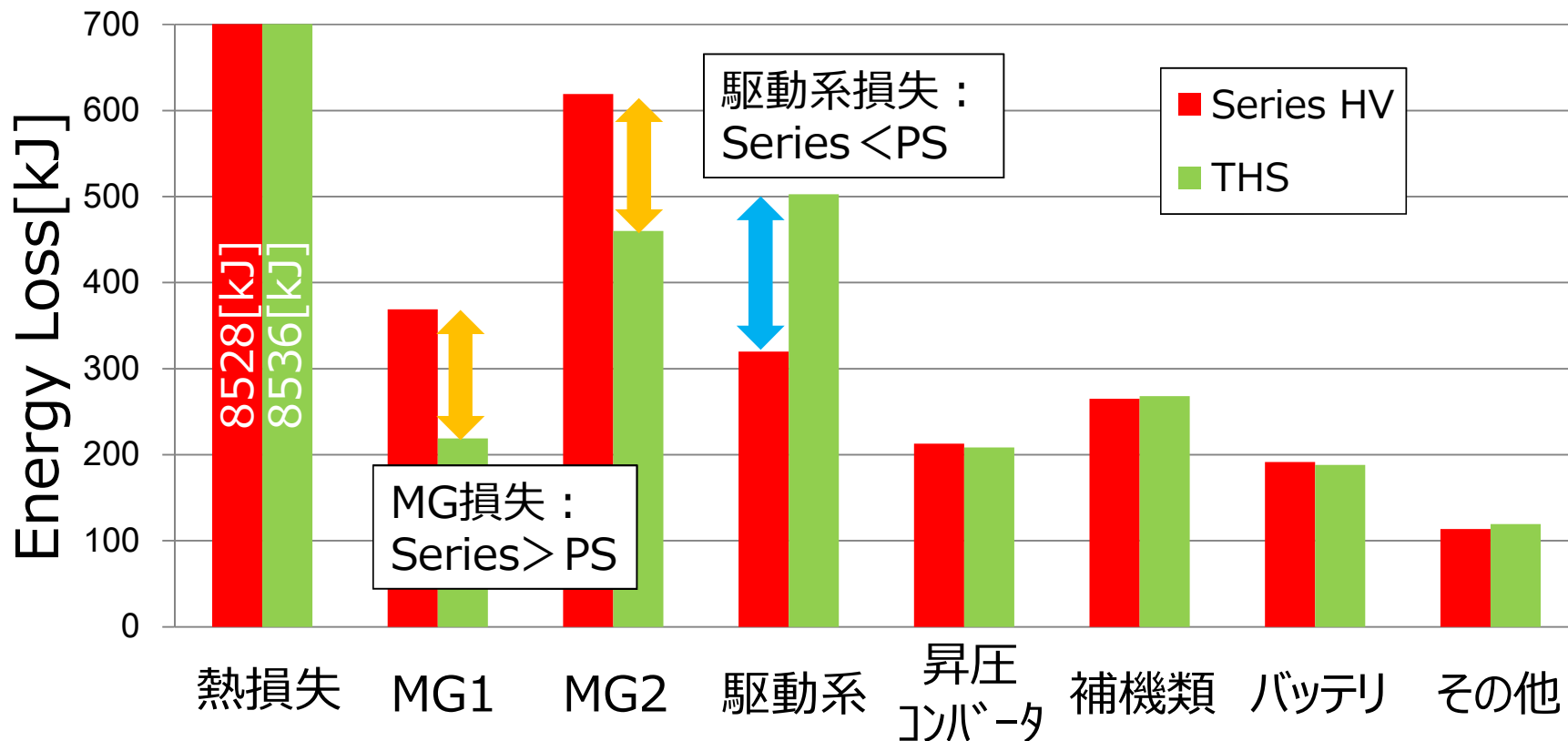


シリーズHVはTHSに比べ、燃費が不利で電費が有利



4-9. ③燃費・電費のシステム間比較

解析1：THSが燃費優位な理由

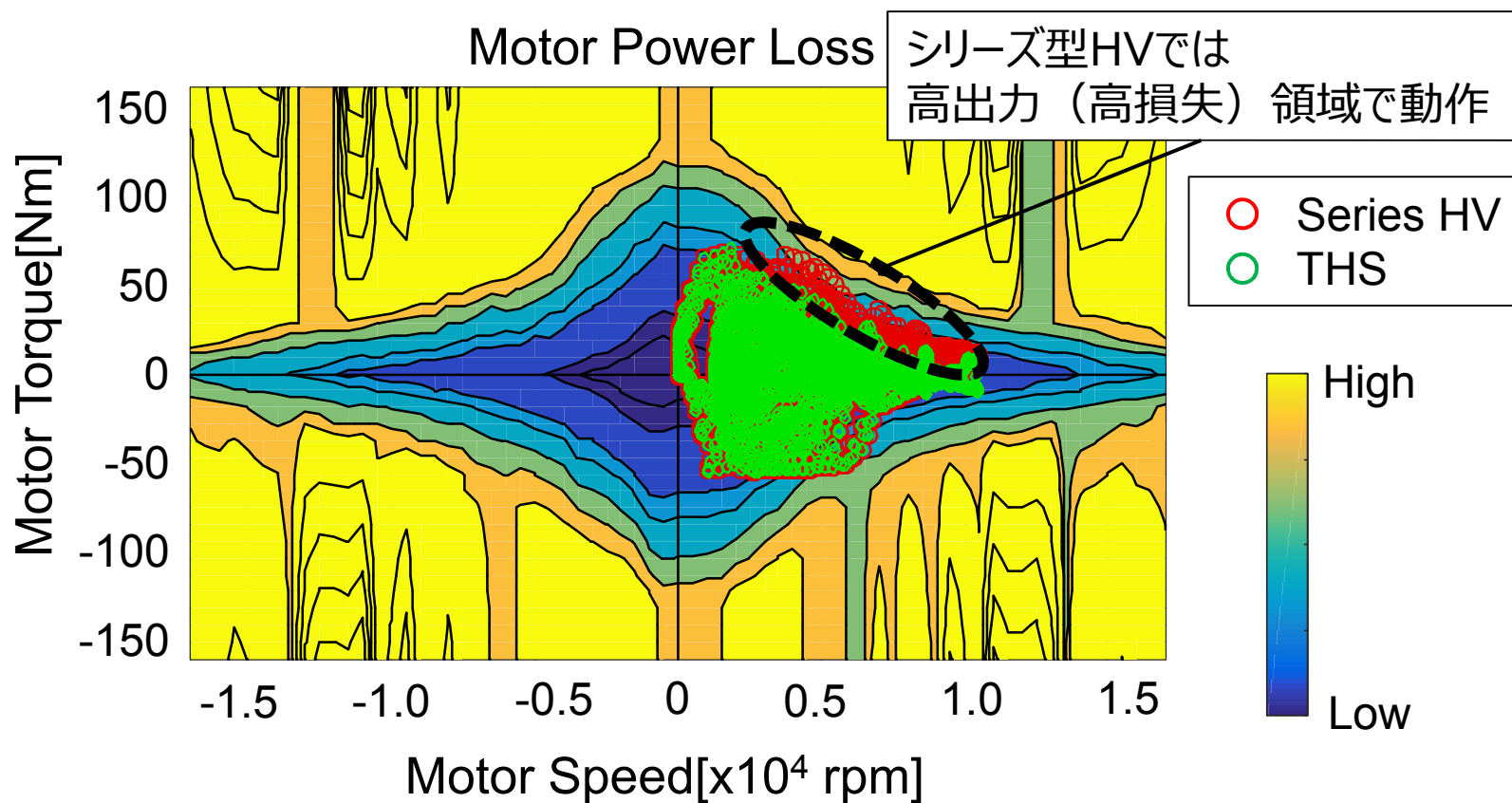


- THSのモータ&ジェネレータ損失はSHVより小さい
 - シリーズHVの駆動系損失はPSHVより小さい
- ⇒トータルではTHSの方が損失小さい



4-10. ③燃費・電費のシステム間比較

解析1：THSが燃費優位な理由



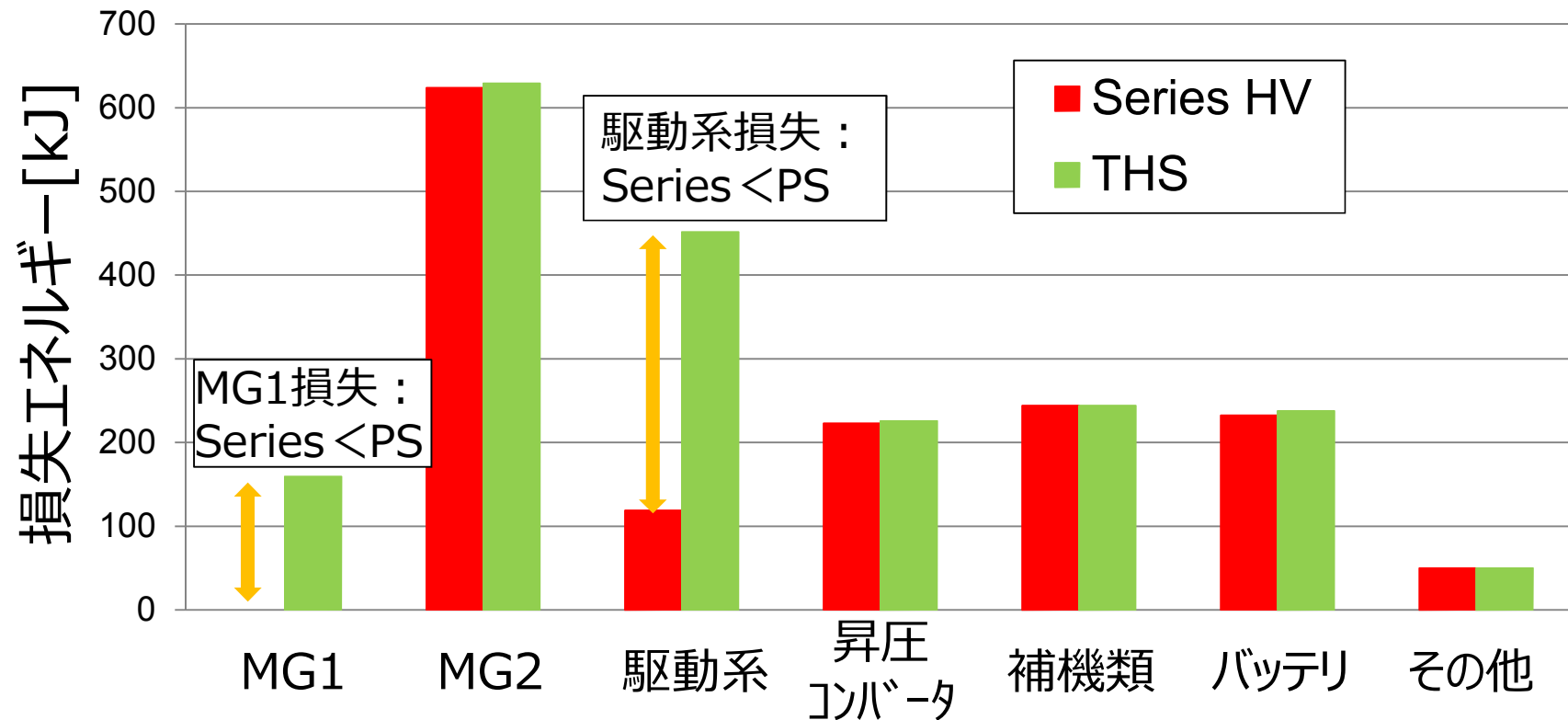
シリーズHVは駆動力をモータのみで発生
⇒モータはより高出力が要求され、高損失領域で動作

37



4-11. ③燃費・電費のシステム間比較

解析2：シリーズHVが電費優位な理由

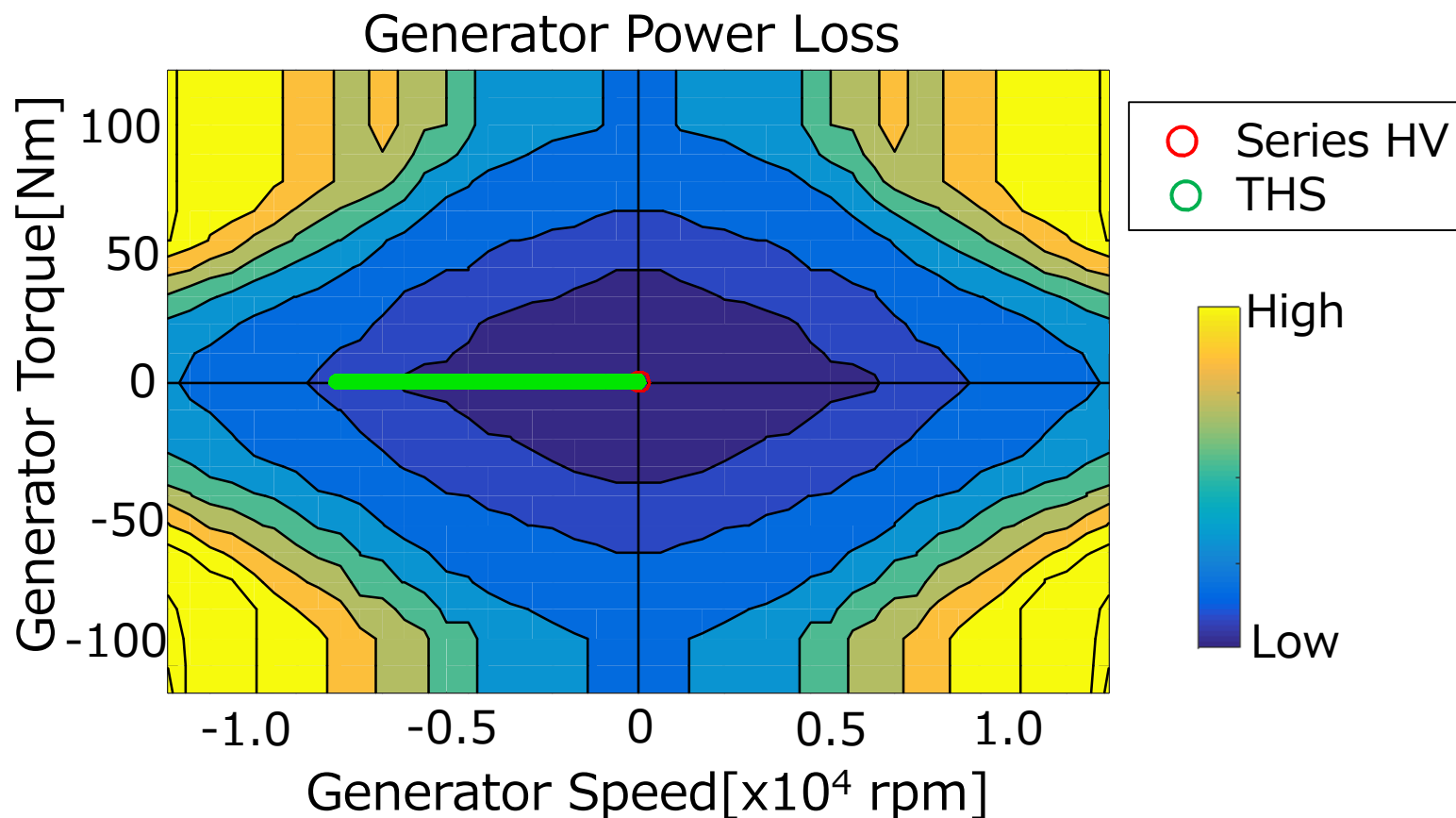


- ・シリーズHVはジェネレータ損失がゼロ
- ・シリーズHVの駆動系損失はTHSより小さい



4-12. ③燃費・電費のシステム間比較

解析2：シリーズHVが電費優位な理由



THSのジェネレータは ~ 7000 rpmで回転(シリーズHVでは完全停止)
 \Rightarrow THSでは機械的・電氣的損失が発生.

39



目次

1. 検討の背景と目的
2. 先行企画シミュレーションとその要件
3. 最適化手法
4. 効果検証
5. まとめ



5-1. まとめ・今後の予定

まとめ

- ・電動パワトレシステムの制御入力列を制御則を用いず、現実的な時間で最適化する手法を開発
- ・異システム間の燃費優劣を手早く、正確に見積ることができることを確認

今後の予定

- ・本手法を先行企画および新システムの制御開発に適用予定
- ・最適化計算の過程で得られた様々な走行データの再利用を検討中
ML・DLなどMatlab機能を使って有効な法則を抽出できないか？など



5-2. Matlab[®] and Simulink[®]の効果

期待通りだった点

- ・プラントモデリング粒度設定のカバーレンジが広い
企画シミュレーションの要求を満足するモデリングが容易.
- ・既存の資産を有効活用できた
社内で広く流通している環境をベースとしており,ユーザに受け入れられ易い
- ・課題となりがちな計算速度向上への対応性
速度向上のための機能が豊富. 本ケースでも良好な結果を得られた

今後改善を望む点

- ・各機能に関する情報へのアクセス性向上
プラントモデル高速化の過程で3種のアプローチを試行
それらの効果の有無や適用可否が試行前に判別できると良い