

# **DRIVESIM**解析レポート

－ハイブリッド3方式によるモード燃費、走行性能の比較－

**MECWARE**

Jun. 2018

松尾技術士事務所

## はじめに

最近、自動車業界では従来のエンジン車から電気自動車への「EVシフト」の動きが加速している。

しかしEVの利便性・信頼性をエンジン車と同じレベルにまで高めるには多くの技術的問題を解決しなければならないのが現状であり、またEVシフトが地球環境にもたらす影響についても十分なアセスメントが必要である。世界各国のEVシフトのロードマップは未だ流動的なものと考えられ、今後内燃機関とモータの双方を搭載するハイブリッド車の果たす役割は大きいものと考えられる。

1997年に初めてのハイブリッド車が登場以来、いろいろな方式が実用化され今日に至っている。プリウスを始めとするトヨタ車に採用されているTHSは遊星ギア動力分割機構を用いたシリーズパラレル方式、ホンダアコードに採用されているi-MMDはクラッチを用いたシリーズパラレル方式、ノートを始めとする日産車に採用されているe-Powerはシリーズ方式に分類される。

本レポートは各方式の特徴を比較するため全く同一の車両諸元の下、ハイブリッドシステム方式の相違によりモード燃費や走行性能にどのような差異が生じるか車両走行シミュレーションソフトDRIVESIMを用いて解析した結果をまとめたものである。

なお比較において用いた動力制御のアルゴリズムは各市販車に採用されているもの<sup>1)</sup>ではなくDRIVESIMで設定できる基本的な制御アルゴリズムであり、示された結果は各方式の優劣を比較したものではないことを最初に断っておく。

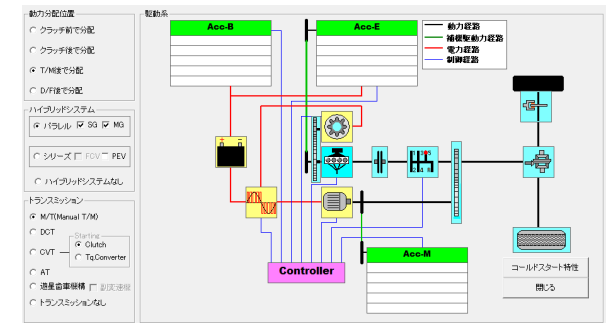
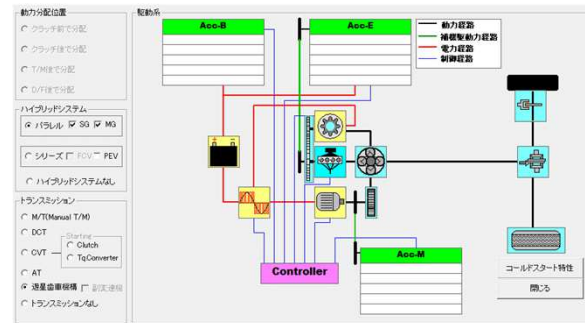
1)市販車の制御は走行時の騒音、振動・乗り心地など自動車の商品性の総合的評価基準に合わせて最適化されるものであり燃費や走行性能のみを目標に最適化されたものではない。

# 車両諸元

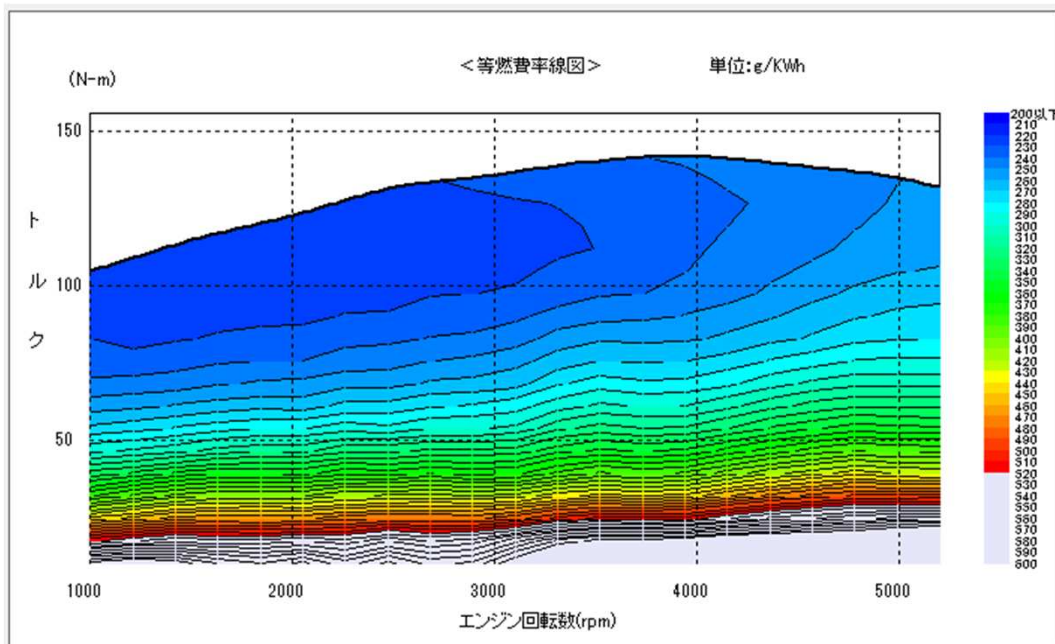
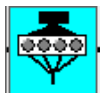
# 車両主要諸元

項目	諸元値
駆動方式	前輪駆動
車両重量(kg)	1310
走行時実車重(kg)	1400
静止時前輪荷重(kg)	750
ホイールベース(m)	2.7
重心高(m)	0.45
前面投影面積(m <sup>2</sup> )	2.5
空気抵抗係数	0.025
転がり抵抗係数	0.01
タイヤ有効半径(m)	0.31
最終減速比	2.834
ハイブリッド方式	遊星ギア(T)
	シリーズ(S)
	シリーズパラレル(SP)

動力源(3方式共)	出力とトルク	
エンジン	最大出力(kW/rpm)	42/5200
	最大トルク(Nm/rpm)	142/3800
MG (駆動用モータ)	最大出力(kW/rpm)	53/3105~16000
	最大トルク(Nm/rpm)	163/0~3105
SG (スタータ発電機)	最大出力(kW/rpm)	23/5491~11000
	最大トルク(Nm/rpm)	40/0~5491

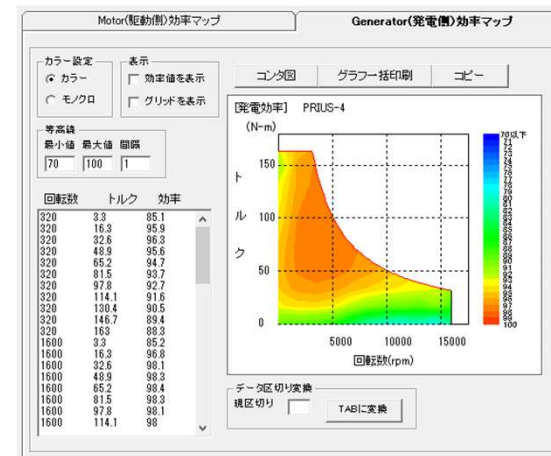


# エンジン燃費・モータ効率マップ

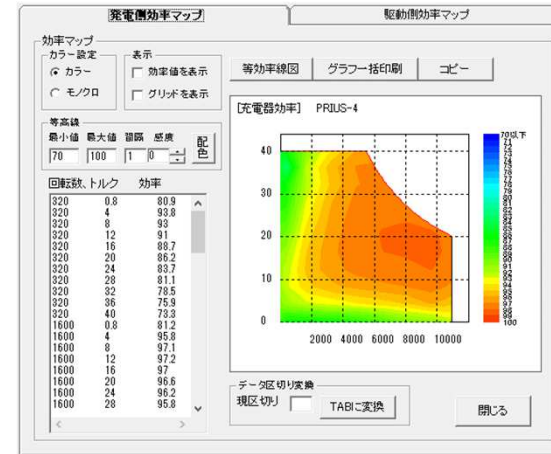


エンジン

- ハイブリッド車用エンジンは出力より燃費指向のものとなっておりEGRやVVTシステムを用いて中低速・中高負荷域に広い低燃費率領域を有するものが多い。

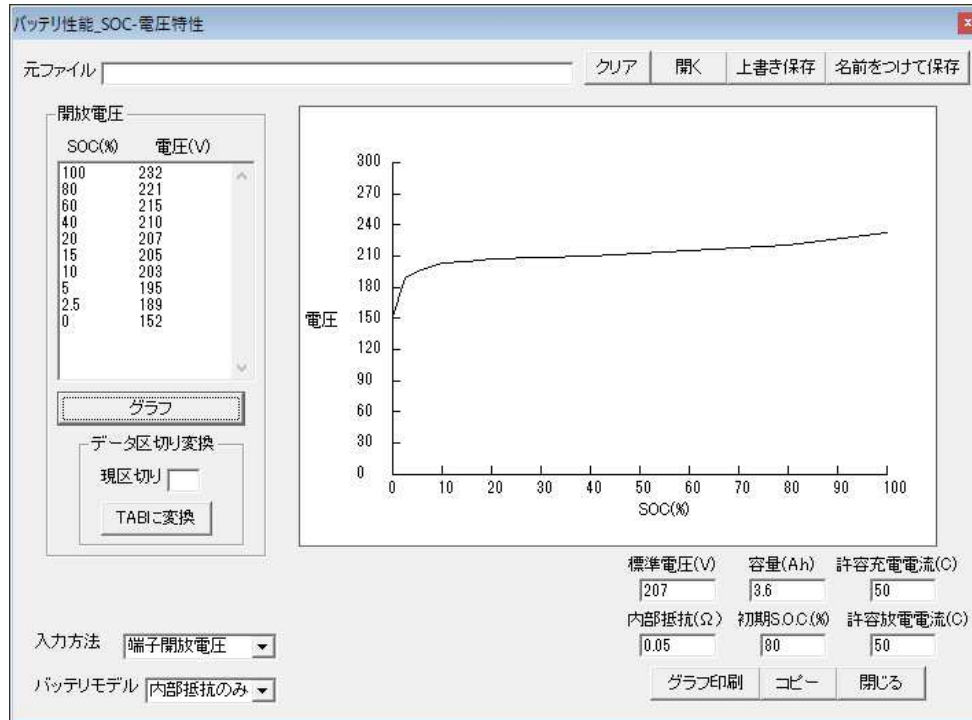


MG



SG

# バッテリー特性・インバータ効率



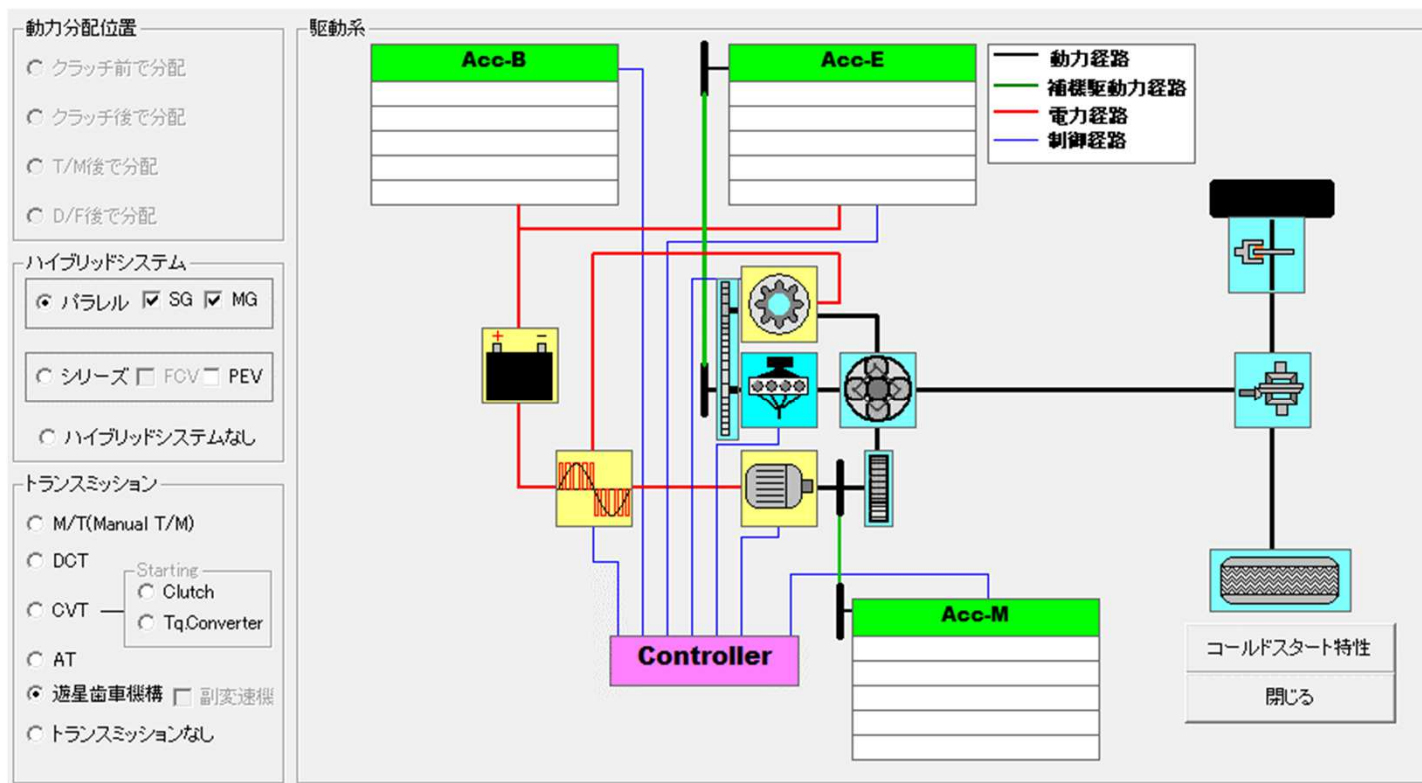
インバータ効率

DC→AC 95 %

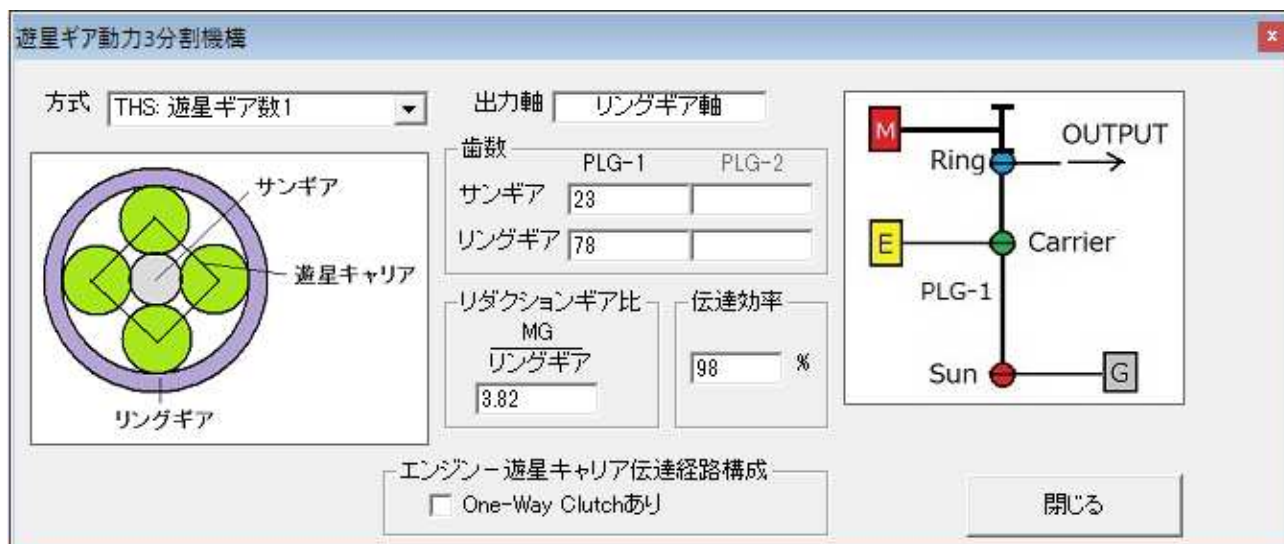
AC→DC 90 %

閉じる

# 駆動系\_遊星ギア方式



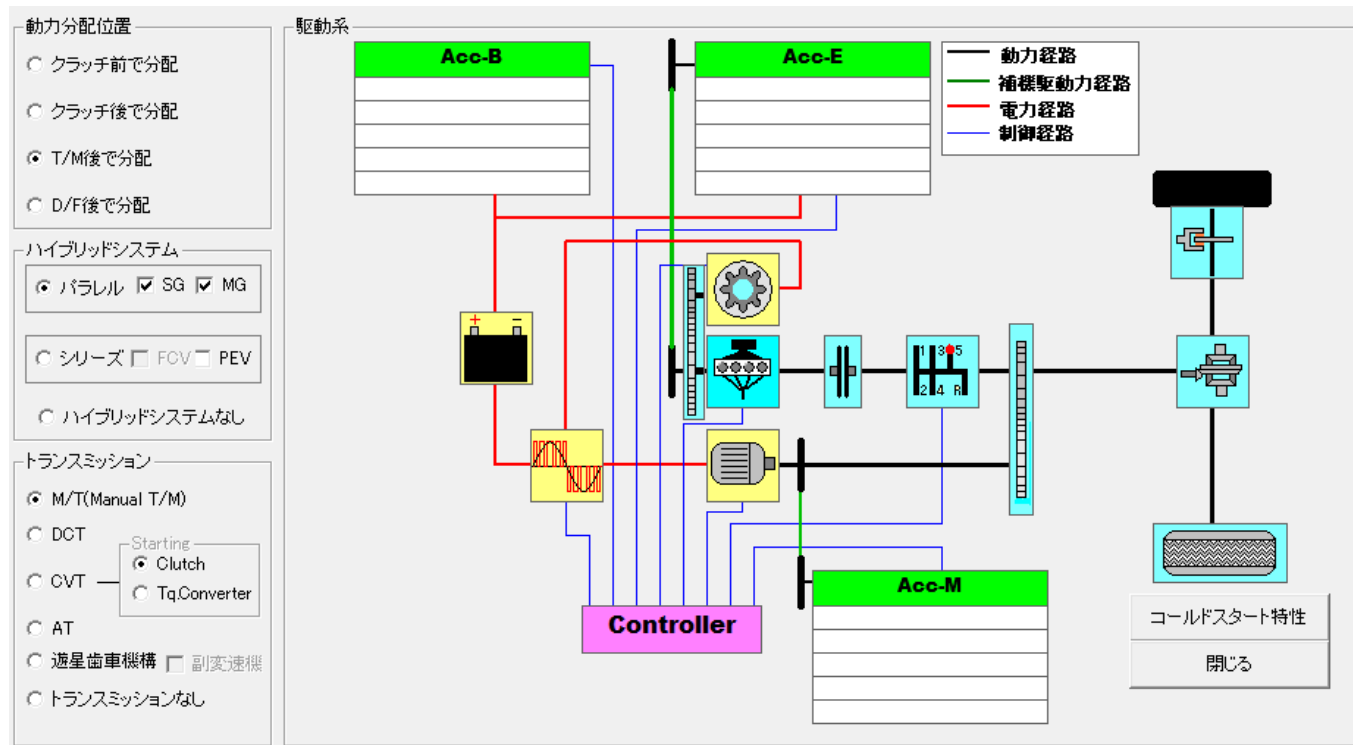
## 遊星ギア動力分割機構



- 動力分割機構は遊星ギア数1のTHS様式 この他遊星ギア数2のGM-VOLTEC II 様式も選択可
- サンギアはSG、キャリアはエンジン、リングギアはMGに各々繋がっており、リングギア軸が駆動輪に繋がる
- MGとリングギアはリダクションギアにより3.82 : 1に減速
- エンジンとキャリア間にワンウェイクラッチを配することによりEV運転の際SGを走行用に使用することができるが今回はワンウェイクラッチなしとする



# 駆動系\_シリーズおよびシリーズパラレル方式



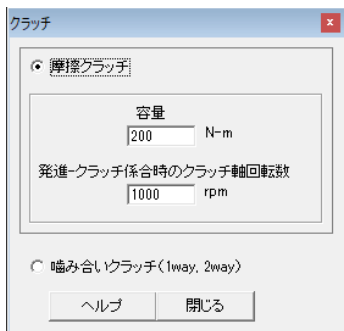
両方式の駆動系構成要素は同じ

シリーズ: クラッチは常時OFFでMGでのみ走行 エンジン SG駆動に使用

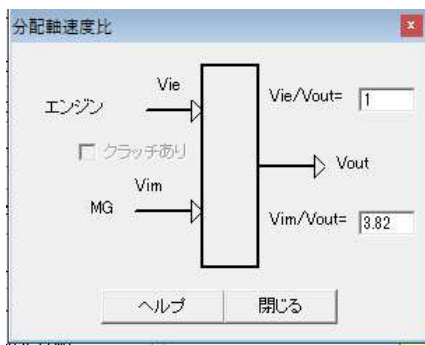
シリーズパラレル: クラッチを走行中ON-OFF エンジン 走行またはSG駆動に使用



T/M内ではギア噛み合いのため伝達損失があるが変速段数は1段とし伝達損失はなく効率100%とする



摩擦クラッチとしエンジンによる発進の際、クラッチ軸回転数は1000rpmとする

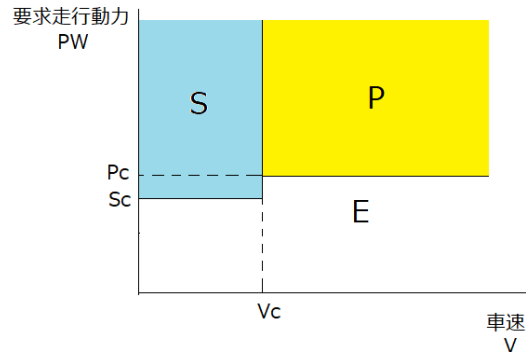


MG～駆動輪間の総減速比を遊星ギア方式と合わせるため速度比を3.82とする

# 動力制御

## (1) シリーズパラレル方式の場合

### ▼動力モード指令



車速 $V$ と負荷 $PW$ （走行に要求される動力）によって動力モードを切り替える

Eモード：

$PW$ が小さい領域は車速に関係なくEV運転

Sモード：

車速が閾値 $V_c$ 以下で $PW$ が閾値 $Sc$ を超えたらシリーズ運転としエンジンはSGで発電しバッテリー充電  
エンジン燃費率の良いSweet-Spot領域で運転できるようにSG発電量とエンジン回転数を制御

Pモード：

車速が閾値 $V_c$ を超え、しかも $PW$ が閾値 $P_c$ を超えたらクラッチを係合してパラレル運転としエンジンを走行に使用

## ▼Sモード走行中の指令

### ▽SG駆動動力の基本指令

- ・ SG駆動動力をバッテリーSOCに応じて決定する
- ・ エンジン燃費率の良いSweet-Spot領域で運転できるようにSG駆動動力に基づきエンジン回転数を決定する

### ▽ SG駆動動力修正指令

- ・ バッテリーSOCが閾値Ccを超えている場合はSモード走行指令をキャンセルしEモードで走行
- ・ エンジン燃費の悪い低負荷域での使用を避けるためSG駆動動力が閾値を下回る場合は閾値に修正する。
- ・ SG駆動動力の基本指令がSG動力の最大値(+)または最小値(-)を超える場合は各々の値に修正する

## ▼ Pモード走行中の指令

### ▽エンジンとMGの動力分担指令

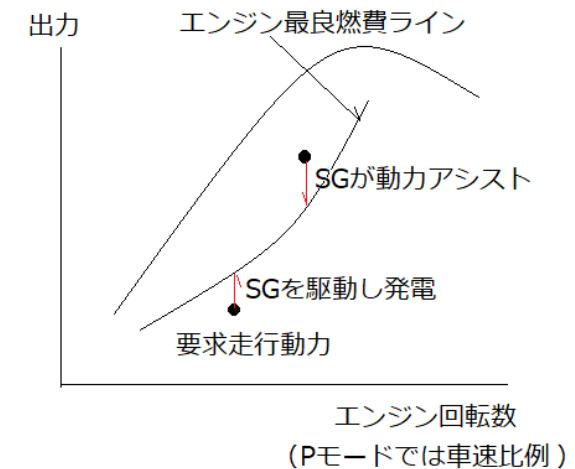
- ・ Pモードでは基本的にエンジンで走行する
- ・ MGは出力ゼロ（補機ありの場合補機動力分のみ）

### ▽ SG駆動動力指令

- ・ MGは走行に寄与しないので(エンジン + SGの出力) = 要求走行動力  
このときエンジン燃費率の良いSweet-Spot領域で運転するため  
SG駆動動力（またはアシスト動力）を制御

### ▽エンジン継続運転指令

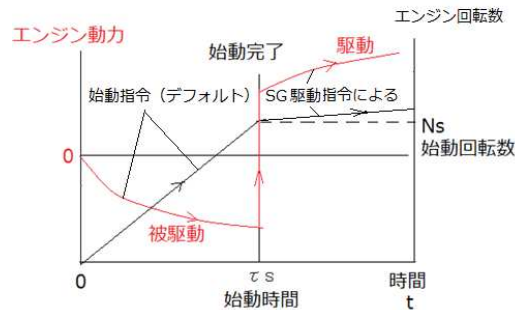
- ・ 頻繁すぎるエンジン始動を避けるためSまたはPモード走行中エンジン運転時間が所定時間経過するまではたとえエンジン停止指令（S→E、P→E）が出ても当該指令をキャンセルしエンジン運転を継続。



## ▼エンジン始動指令

E→SまたはE→Pにモード切替時はエンジン停止状態から運転状態まで遷移するための始動指令が出される  
始動中のエンジン回転数、動力値は各指令をキャンセルし、始動時デフォルト指令にしたがう

### ▽ E→S切替時の始動：SGでエンジンを駆動し始動



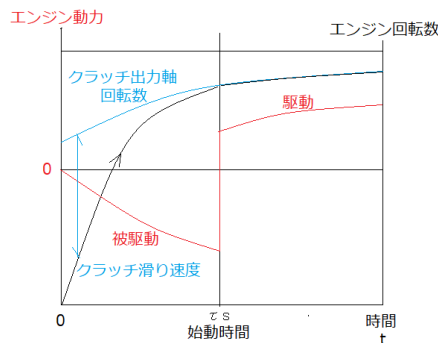
#### ○始動中 ( $0 < t < \tau s$ )

エンジンは完全被駆動とし燃料はカット（噴射量=0）  
エンジン回転数はSGにより  $0 \rightarrow N_s$  に直線的な時間変化  
また  $\tau s$  および  $N_s$  は入力値とする

#### ○始動完了後 ( $\tau s < t$ )

エンジンは駆動運転となりエンジン動力はSG駆動指令値にしたがう

### ▽ E→P切替時の始動：クラッチを係合しながらMGで始動する場合



#### ○始動中 ( $0 < t < \tau s$ )

エンジンは完全被駆動とし燃料はカット（噴射量=0）  
走行中の切替の場合、始動開始時はクラッチ滑り率=1でこれを始動完了までに0になるよう滑り率を制御する。応答時定数= $\tau s/4$  ( $\tau s$ での滑り率2%未満)  
MGはこの間、エンジンを駆動しながら要求走行動力も供給するのでクラッチとMG動力の同時制御が課題となる。

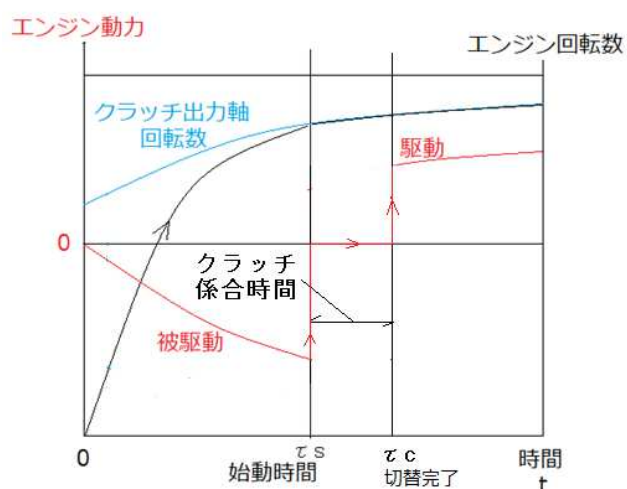
#### ○始動完了後 ( $\tau s < t$ )

エンジンは駆動運転となりエンジン動力は指令値にしたがう

▽ E→P切替時の始動：SGで始動し、始動終了後クラッチを係合する場合

切替指令が出たら以下の2ステップで切替を完了する

- ①クラッチ断絶のままSGによりエンジンを始動
- ②始動が終了したらクラッチを係合



○始動時間( $0 < t < \tau_s$ )

エンジンは完全被駆動とし燃料はカット（噴射量=0）  
走行中の切替の場合、始動完了までにエンジン速度とクラッチを合わせるようSGで速度制御する。応答時定数= $\tau_s/4$  ( $\tau_s$ での滑り率2%未満)  
MGはこの間、エンジンを駆動しないので要求走行動力のみ供給

○始動完了からクラッチ係合終了まで( $\tau_s < t < \tau_c$ )

エンジンを時間 $\tau_s$ で到達した速度のまま無負荷運転しつつクラッチを係合。  
クラッチは衝撃なく係合を終えることができる。  
クラッチ係合に伴う動力の加減がないのでMGはこの間要求走行動力のみ供給

○クラッチ係合終了以後( $\tau_c < t$ )

エンジンは駆動運転となりエンジン動力は指令値にしたがう

SGでの始動の方が動力制御は安定するが切替時間が長くなることやクラッチ係合期間エンジンの無負荷運転のための燃料無駄使いが問題である。そこで今回はMGによる始動を選択した。

## ▼制御指令の全コード

コードリスト

<制御指令と構造体変数>		
指令	条件文	目標値/処理
<b>動力指令</b>		
1	If ([DCM]=0)	Pe=[Pae];
2	If ([DCM]=1)	Pm=[Pam];
<b>クラッチ/エンジン</b>		
1	Default	ICM=0;IEON=0;
2	If (40< [Vh])and(8< [RNp])	ICM=1;IEON=1;
3	If ([Vh]≤ 40)and(5< [RNp])	
4	If ([Mbsoc]< 67.5)	IEON=1;
<b>変速位置</b>		
1	Default	ITM=1;
<b>SG駆動</b>		
1	Default	Typ=0;SGp=0;
2	If ([DCM]=0)and([IEON]=1)	SGp=(82-[Mbsoc])*[tetCHG];
3	If (23< [SGp])	SGp=23;
4	If (10< [SGp]≤ 100)	Ne=-5711+(5711 <sup>2</sup> +1379343*[SGp]);
5	If ([SGp]≤ 10)	Ne=1000;
6	If ([SGp]≤ 5)	SGp=5;
7	If ([DCM]=1)and([IEON]=1)	
8	Default	SGp=[Ptet]-[RNp];

<外部変数>	
No.	外部変数
1	[Ttet] (18*[Ne]+205600)/2600
2	[Ptet] 3.141593/30*[Ne]*[Ttet]/1000
3	[tetCHG] 1
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

<制御に関する表記>

- ▼DefaultはEV走行(クラッチOFF エンジンOFF)
- ▼走行条件により選択される指令
  - 車速40km/h超で走行必要動力が(+8kW)以上→(クラッチON エンジンON) エンジン走行
  - 車速40km/h以下で走行必要動力が(+5kW)以上→(クラッチOFF)
  - ノバッテリーSOC<67.5%ならエンジンONとしシリーズHV走行
  - ノバッテリーSOC=67.5%ならEV走行
- ▼発電指令
  - ノシリーズ走行時
    - ・発電動力は予め決めた動力計算の式にしたがう
    - ・エンジン運転域はエンジン燃費率の最良ライン上の点を使う
    - ・発電動力指令が5kW以下なら5kWに指令修正
  - ノエンジン走行時
    - ・最良燃費率点で運転するため発電量を調整する。
- ▼エンジンの運転時間

<Flag変数>

[ICM]:クラッチ係合状態 1:係合 0:断絶

[IEON]:エンジン稼働 1:稼働 0:停止

<その他変数>

[Vh]:車速(km/h) [RNp]:要求走行動力(kW)

[Pe]:エンジン動力(kW) [Pm]:MG動力(kW) [SGp]:SG駆動動力(kW)

[Pae]:エンジン補機の合計動力(kW) [Pam]:MG補機の合計動力(kW)  
SGはエンジン駆動補機として扱う

[Ne]:エンジン回転数(rpm) [ITM]:変速位段位置

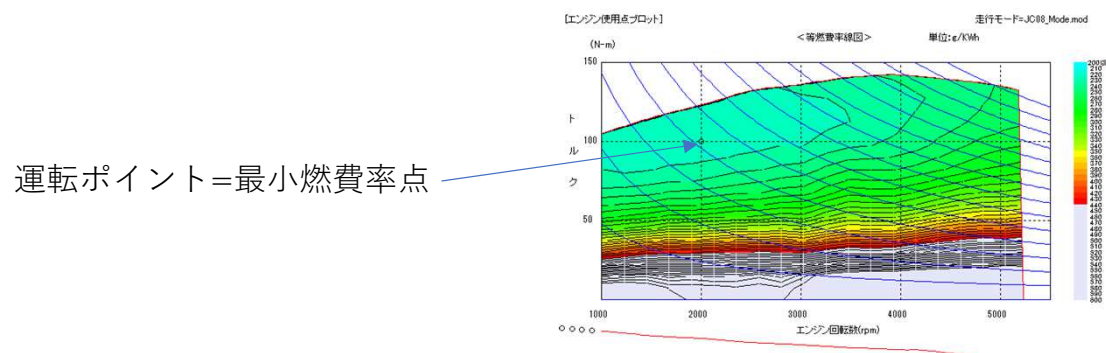
[Mbsoc]:駆動用バッテリーのSOC(%)

- ・パラレル運転ではエンジン動力とMG動力から求めた合計駆動動力が要求走行動力と等しくなるよう両者の動力を決めたがって動力指令ではエンジン動力PeまたはMG動力Pmのいずれかを指令するだけでよい。  
例) "If [ICM]=0 Pe=[Pae]"というコードはクラッチOFFの場合エンジンはSGを含むエンジン補機動力のみを供給することを明に指令すると同時にMGは走行動力を含むその他の必要動力をすべて負担することを暗に指令している
- ・始動指令はデフォルト指令を使用するのでコーディング不要

## (2) シリーズ方式の場合

### ▼SG駆動動力指令

- ・ バッテリSOCが閾値Ccを下回ったらEモードからSモードに切り替え
- ・ Sモード走行におけるエンジン運転ポイントは常時最良燃費率点としSG発電量も一定となる。



### ▼エンジン始動指令

- ・ E→S切り替え時のエンジン始動指令はシリーズパラレル方式に同じ

### ▼エンジン継続運転指令

- ・ シリーズパラレル方式と同じくSモード走行中エンジン運転時間が所定時間経過するまではたとえエンジン停止指令 (S→E) が出ても当該指令をキャンセルしエンジン運転を継続。



# ハイブリッド 3 方式のJC08<sub>(HOT)</sub>モード燃費

## JC08モード燃費とエネルギー損失比較

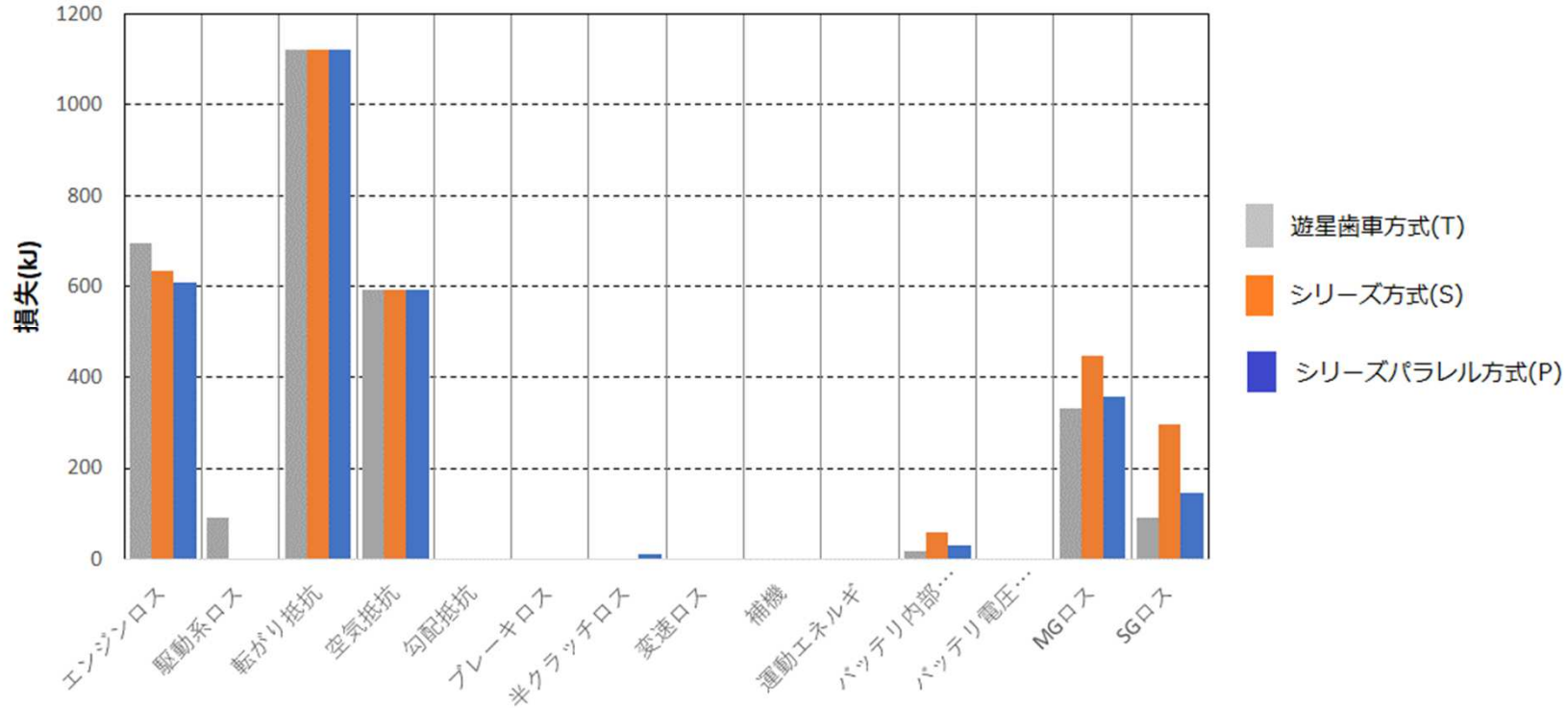
- ・ シリーズパラレル(SP)のエネルギー損失が最も小さく燃費が優れている
- ・ シリーズ(S)はエネルギー損失が最も大きい。主な原因はMG、SGに関わる総合損失が大きいこと

項目	遊星ギア(T)	シリーズ(S)	シリーズパラレル(SP)
JC08モード燃費(km/L)	41.48	40.06	42.9
バッテリーSOC(走行前/走行後)	80/79.98	80/80.16	80/79.86
全エネルギー損失(kJ)	2946(+73)	3150(+277)	2873
以下内訳)			
エンジン機械損失	695(+86)	634(+25)	609
駆動系伝達損失	91(+91)	0(0)	0
転がり抵抗損失	1121(0)	1121(0)	1121
半クラッチロス	0(-12)	0(-12)	12
空気抵抗損失	595(0)	595(0)	595
バッテリー内部抵抗損失	19(-13)	59(+27)	32
MG運転に関わる総合損失	332(-26)	445(+87)	358
SG運転に関わる総合損失	93(-53)	295(+149)	146

( )内は対SP方式との差

- ・ エンジン機械損失：エンジン機械摩擦による損失 (=図示仕事-正味仕事)
- ・ 駆動系伝達損失：動力分割機構のギア・潤滑油等による損失
- ・ 半クラッチロス：クラッチ係合時、入力側と出力側の回転速度差による滑り摩擦損失
- ・ バッテリー内部抵抗損失：バッテリー充放電電流が流れる際のバッテリー内部抵抗による損失
- ・ MG(SG)総合損失：MG(SG)効率、インバータ/コンバータ効率等に起因するMG(SG)運転に関わる全損失

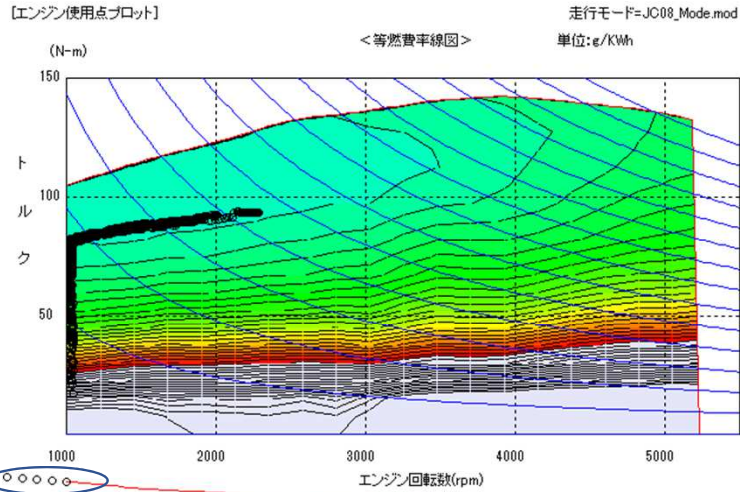
走行時エネルギー損失内訳



- ・ 転がり抵抗と空気抵抗という動力源由来ではない2つのエネルギー損失要因を除くと、エンジンロスが最も大きい。エンジン稼働時間を極力短くし、さらにMG、SGの動力出し入れも極力少なくするとエネルギー損失は少なくなることがわかる。

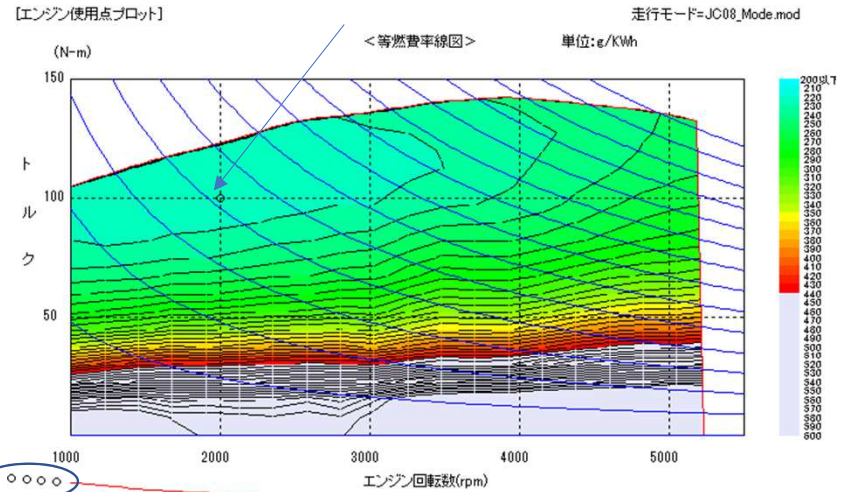
# エンジン運転ポイント分布の比較

運転ポイント=最小燃費率点

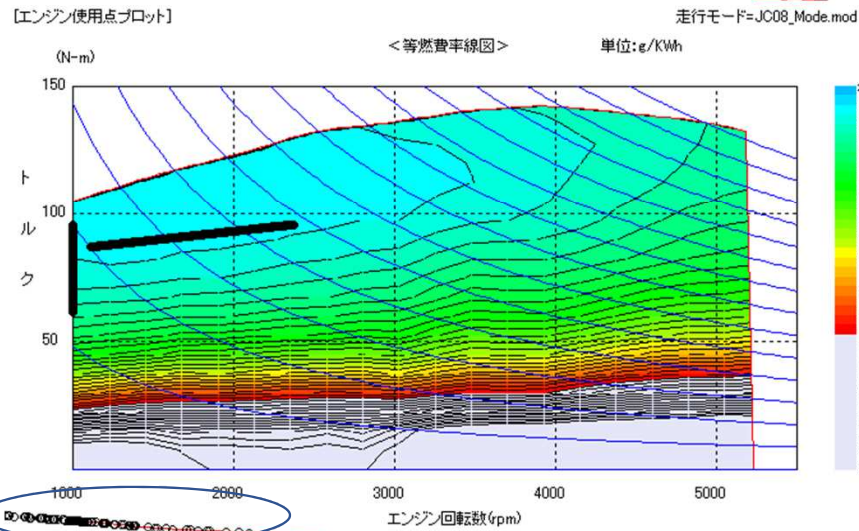


遊星ギア方式

エンジン始動のための被駆動運転



シリーズ方式



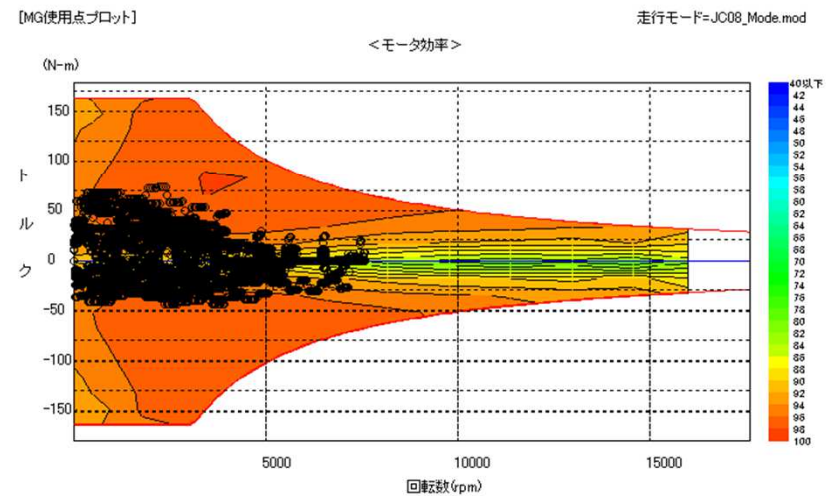
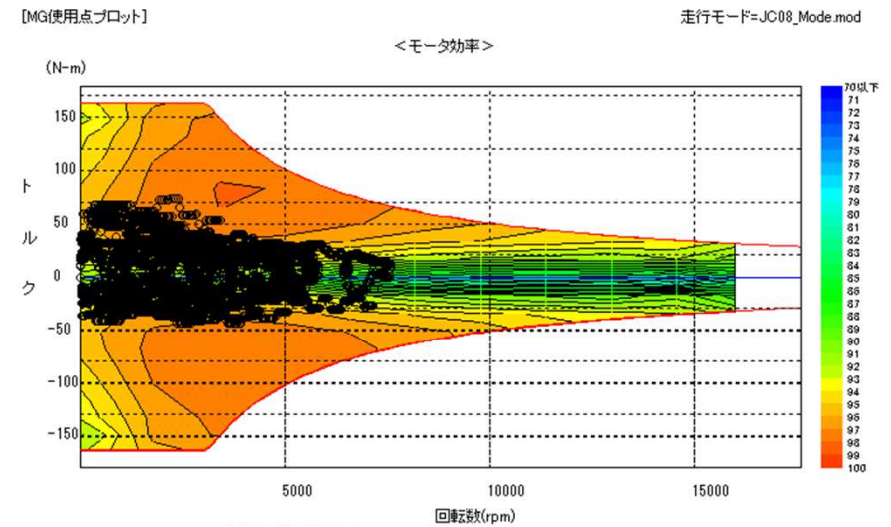
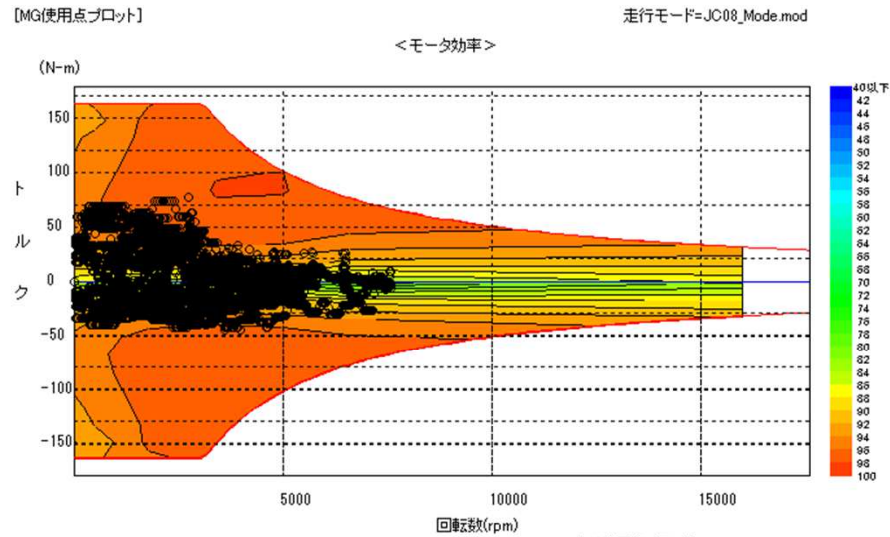
シリーズパラレル方式

## エンジン燃費率の比較

項目	遊星ギア(T)	シリーズ(S)	シリーズパラレル(SP)
エンジン正味仕事合計(kJ)	2250	2520	2260
燃料消費(cc)	197.03	204.09	190.55
平均正味燃費率(g/kWh)	233	215	224

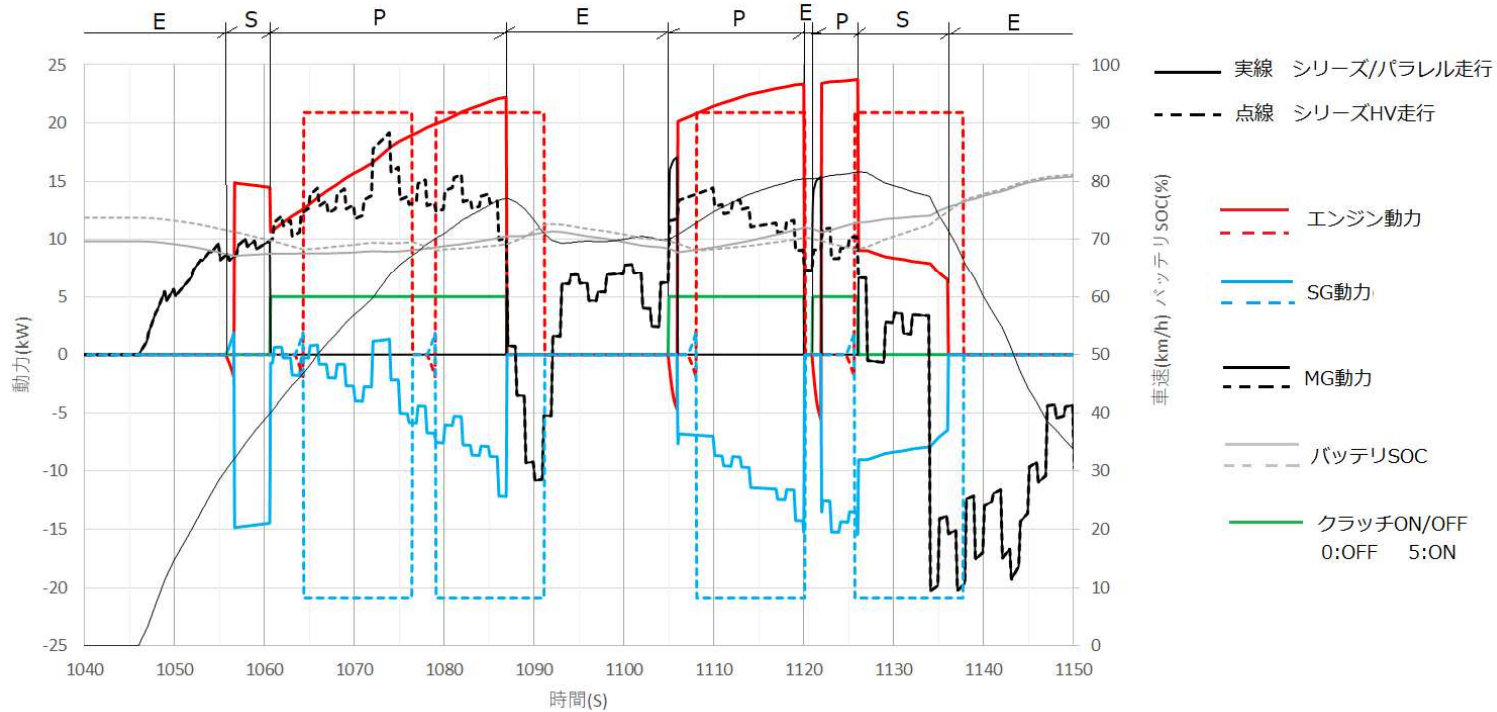
- ・シリーズ(S)は最良燃費率点で常時運転するため平均燃費率は最良である。
- ・シリーズパラレル(SP)は最良燃費率点を含む低燃費率領域(Sweet-Spot)を使用するのでシリーズ(S)に比べ平均燃費率は4%程度増加する程度である。
- ・シリーズ(S)とシリーズパラレル(SP)を比較するとエンジン単独での燃費はSの方が4%良いが走行を通して全エネルギー損失はSの方が9%多いので走行燃費ではSの方が5%程度劣ることがわかる。
- ・遊星ギア方式(T)は燃費率の悪化する低負荷域を一定時間使用するので平均燃費率はシリーズ(S)に比べ8%程度悪化する。

# MG運転ポイント分布の比較



## モード走行中の動力制御比較（シリーズパラレル(SP)とシリーズ(S)）

E: EV運転      MG稼働-クラッチOFF-エンジン停止-SG停止  
 S: シリーズ運転      MG稼働-クラッチOFF-エンジン稼働-SG発電  
 P: パラレル運転      MG稼働-クラッチON-エンジン稼働-SG発電または動力アシスト

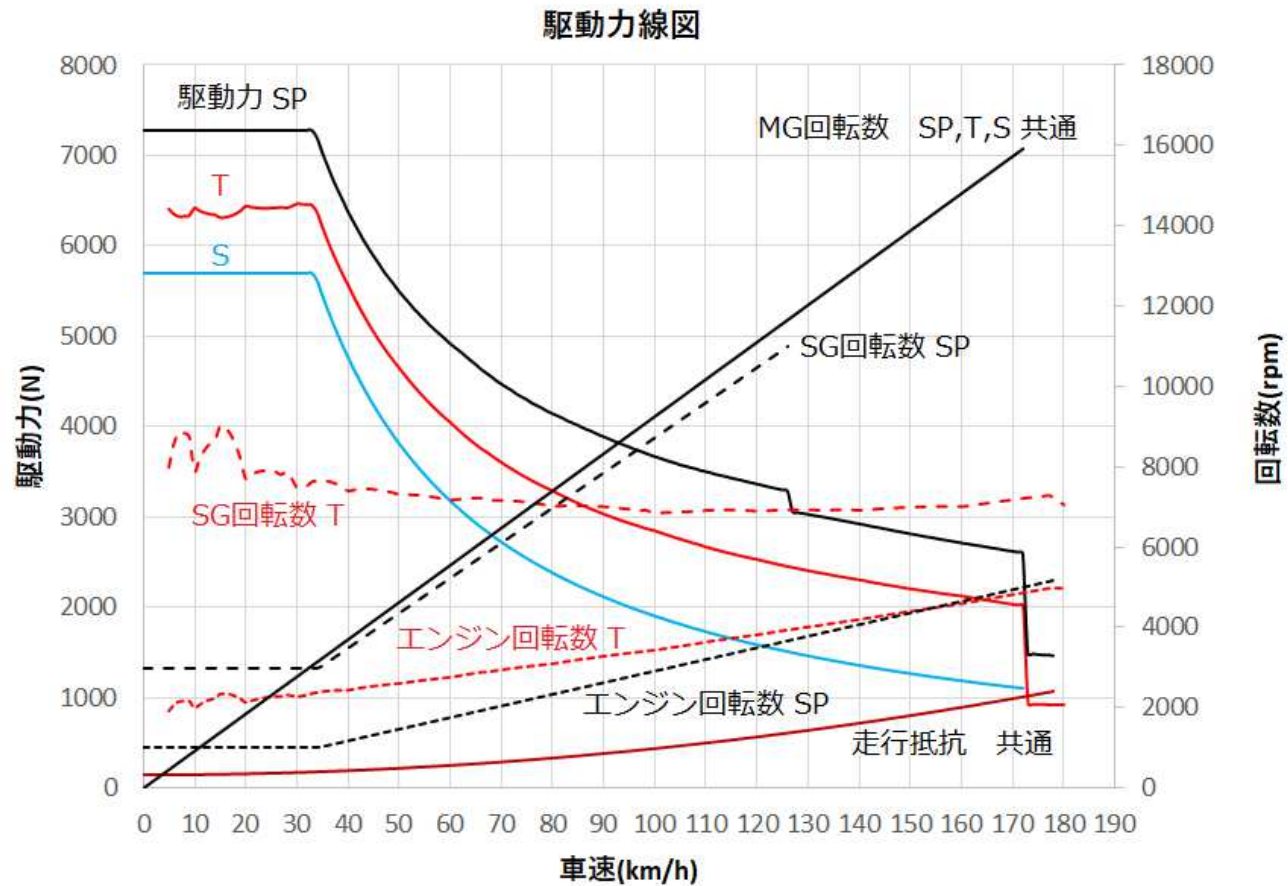


- ・ JC08モードの最後の高速走行時の動力の使用履歴を比較。シリーズ(S)はエンジン動力を全てSG駆動に費やしているのに対しシリーズパラレル(SP)はエンジンはSGを駆動し発電しながら車両を走行させていることがわかる。

# ハイブリッド 3 方式の走行性能



# 駆動力



- ・ シリーズパラレル(SP)ではSG動力(+)を走行に使用できるが遊星ギア(T)はSGをエンジン回転数制御のための動力吸収(-)にしか使用できないため駆動力はSPの方がTより大きい

## 最高速と発進加速性能

走行性能項目	遊星ギア(T)	シリーズ(S)	シリーズパラレル(SP)
最高速(km/h)	172.7	172.7	178.6
発進加速 0-400m(s)	17.33	18.79	16.39
発進加速0-100km/h(s)	10.15	13.06	8.78

搭載する動力源の動力を全て動員して走行できるのでシリーズパラレルSPが最も走行性能が高い。

# 結論

3方式のモード燃費とエネルギー損失内訳結果から以下のことがわかる

1. エンジン機械ロスのおめる割合が大きいのでエンジン稼働時間は極力短くする。  
このことはハイブリッド方式に関係なくいえる。
2. エンジンでSGを発電し、得られた電力をバッテリーに蓄電したりMGに供給するとその過程で電力損失（MG効率、インバータ効率、電池内部抵抗など）が生じる。エンジンの最良燃費率ポイントを使用するシリーズ方式はエンジン単体での燃費は良いが発電、放電の過程で増加する電力損失のために駆動系全体ではエネルギー損失が増加しモード燃費では不利になる。
3. したがってエンジンは極力稼働させないが、一端稼働させたらその動力は直接走行用に使うのが燃費にとっては良い。エンジンをパートタイムで走行に使用できるシリーズパラレル(SP)がモード燃費を追及する上では有利である。
4. 走行性能ではシリーズパラレル(SP)がエンジン、MG、SGの動力を全て走行に充てることのできるため有利である。
5. ただクラッチを用いるシリーズパラレル(SP)ではエンジン始動中のクラッチおよびMG、SG動力の制御が課題である。