

改訂版は下記にあります。  
<http://www.machine.or.jp/hiroba/pdf/yada63.pdf>



## ハイブリッドカー(プリウス)における遊星歯車機構の役割

連載講座:歯車応用機構の設計の一部

機械の研究 Vol.50、No10、 p1095-1101

### 3 ハイブリッドエンジン(プリウス)によるJ直線の例

電気自動車の最近の話題の一つにハイブリッドエンジンがある。これは電気自動車の電池の能力不足をエンジンと組み合わせることによって、一回の充電あたりの走行距離を伸ばそうとすることを目的としている。しかしエンジンは排気ガスの発生を避けることができないし、本来電気自動車の開発目的が自動車の脱石油、排気ガス対策であることから電気自動車にエンジンを積むことは自己矛盾というべきであろう。したがってこのようなハイブリッドカーにエンジンを載せるためには排気ガスの発生を押さえ燃費を上げなければならない。そのためにはエンジンを小型にすることと、効率の良いところで運転することでその目的を達成しようとしている。また他方では電気自動車の性能アップという目的を満たす必要がある。ハイブリッドカーはこの両睨みの中で両方の性能を満足しなければならない難しさがあるといえよう。この方式にはシリーズ方式と呼ばれるものと、パラレル

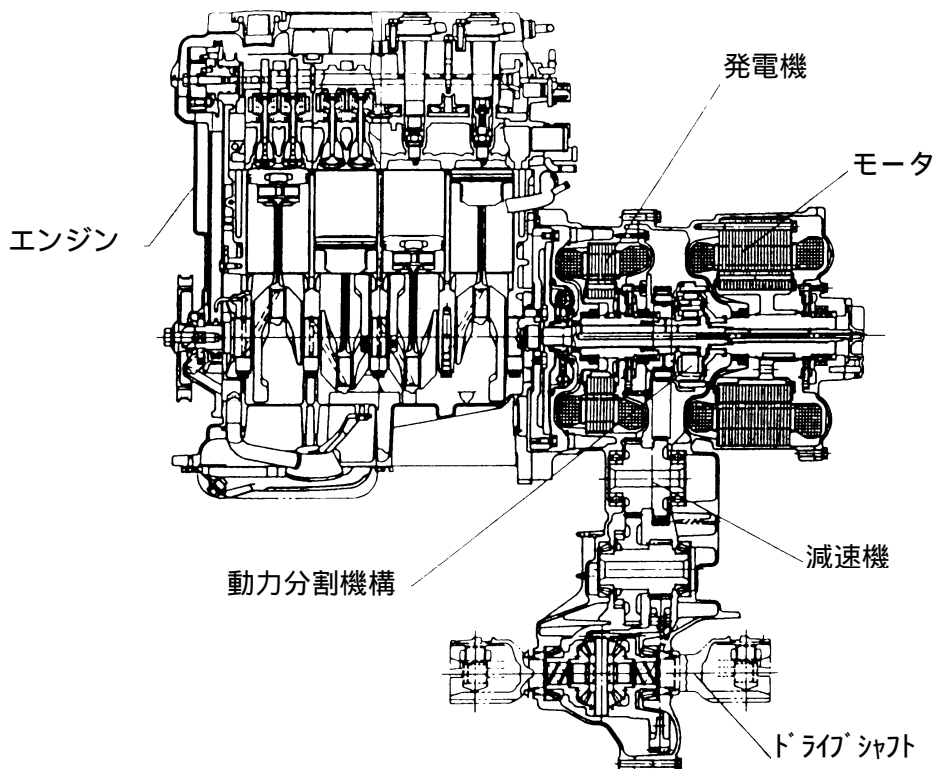


図 1 プリウスハイブリッドエンジン<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <http://www.toyota.co.jp/eco/>

方式と呼ばれるものがあるが、プリウスではパラレル方式を採用した<sup>2</sup>。

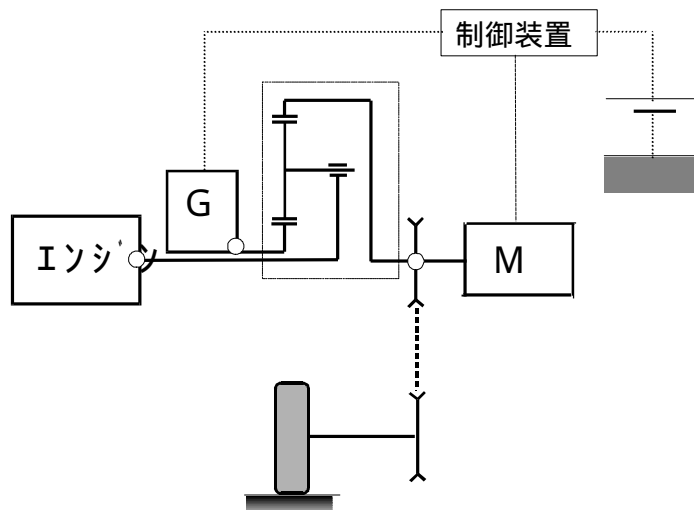


図 2 スケルトン図

パラレル方式はエンジンと電動機の動力を重ねて使うような方式であるために、動力の分配機構が要求される。遊星歯車機構はそのための仕掛けとして最適であるので、このような方式では一般に遊星歯車機構が採用される。ここではプリウス方式を閉路型遊星歯車機構の例題として遊星歯車機構がどのように使われているかを述べる。なおここでの内容は試乗した上で記述したが、その当否はトヨタ自動車の設計担当者に直接確認してわけではない。したがって多少の思い違いがあるかもしれないことを予めお断りしておきたい。

### 3.1 構造と特性図

#### 3.1.1 構造

プリウス方式の構造図は図 1 に示すとおりであるが、これをスケルトン図で示すと図 2 のようになる。すなわちエンジンの出力はキャリア軸 H につながれ、太陽歯車が発電機 G に、また内歯歯車が電動機 (モータ) M と車輪に接続されている。ここで発電機 G と電動機 M は電氣的に接続されていて発電機の電気出力は電池に充電する場合と、電動機に直接供給する場合がある。逆に電動機は発電機から電力の供給を受ける場合と電池からもらう場合の 2 通りがある。ハイブリッドエンジンとしての性能評価は電池の電力供給能力で行

<sup>2</sup> この方式が発表される前に同じシステムをエクオスリサーチ / アイシン AW が共同開発品として発表している。ただエクオス / アイシンのものはエンジンの出力部分と変速機の間にはワンウェイクラッチが設けられているところが異なる。(図19参照)。

Yamaguchi, K. Miyaiishi, Y. and Kawamoto, M, Dual System- Newly Developed Hybrid System, EVS-13, Symposium proceedings(1996), Vol.1, 603-610

われなければならない。しかしここではその部分まで立ち入る余裕がないので、発電機と電動機の役割に限って述べることにする。

さて発電機と電動機の電氣的結合はこの間で機械的には速度の無段変速が行われているので、発電機 - 電動機系は無段変速機 R と見ることが出来る。したがってこのスケルトン図をシステム図に描き直すと図3のようになる。ここで端子の配置が図2のスケルトン図と右左逆になっているのは、今までの考察との一貫性を保つためのものである。また端子 v は構造図で言えば減速機の入力側に相当し、車輪につながる出力端子である。v の先に減速機があるが、ここでは減速機部分までの考察は必要ないのでこのようにした。なおこのシステム図からわかるようにこの系は出力結合型を示している。

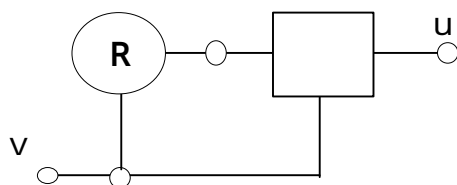


図3 システム図

### 3.1.2 特性図

遊星歯車機構の端子を図3 図3のように設定して特性図(図4)を描く。この場合遊星歯車機構には2K-H型を採用していることは図1から分かるが、その歯数関係が定かでないので、内歯歯車歯数  $Z_r$  と太陽歯車の歯数  $Z_s$  の比 ( $Z_r / Z_s$ ) を便宜的に3とすると、 $j^{H21} = -3$  より、伝達比の関係から  $j^{12H} = j^{123} = 4$ 、J直線はX,Y座標上の(0,  $j^{123}$ )、および(1, 1)の2点を通過する直線で表されることは既に述べた。したがって特性図上のJ直線は図4のように表される。

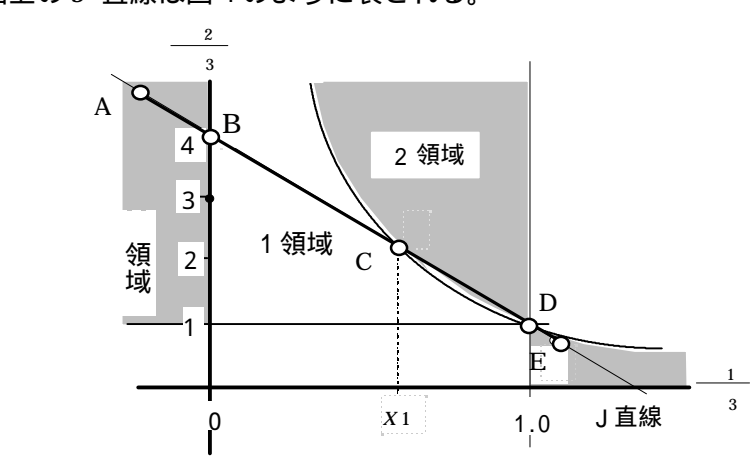


図4 J特性図

この特性図（図4）の横軸は  $\omega_1 / \omega_3$  であるので、出力軸とエンジンの角速度の比である。エンジンの回転方向は不変でありその回転方向を正、車が前進しているときの  $\omega_1$  の回転方向を正方向とするならば、横軸の正座標は車の前進方向をしめす。このように回転方向を決めれば縦軸  $\omega_2 / \omega_3$  の正座標は太陽歯車がエンジンと同一方向に回っていることを示している。また発電機 G に関しては通常は  $\omega_2$  が正方向回転のとき発電している。

### 3.2 車両の運動

プリウスにはモニターがついていて、ナビゲーションシステムによる地図情報表示と車両の動力状態表示を切り替えて使える。動力状態モニターは電池の状態と動力の流れの表示をさらに切り替えることができる。動力の流れの表示はエンジン E、車輪 W、電池 B、モーター m がイラスト表示されていて動力が流れている方向を矢印で示す。その画面を記号で表わすと図4のようになっている。ここで m は図2の電動機 M ではなく図3のシステム図における R と  $\omega_2$  を含めた部分を示している。

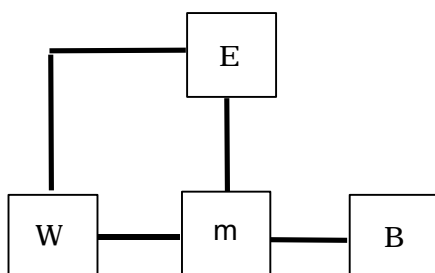


図5 モニター画面の概略図

#### 3.2.1 停車状態

図4において無段変速機 R の変速領域を J 直線上の A 点から E 点の領域で表すと、車の前進状態は B - E の領域で表される。ここで B 点は車が停止している状態を示すが、この時エンジンは必ずしも回転している必要はない。つまり B 点ではエンジンは特定の角速度を要求されていないが実際には省エネルギーの観点から停車時にはエンジンは止めている。

いま B 点でエンジンが回転していると ( $\omega_3 > 0$ )、B 点の Y 軸の値は正の値を持っているので、太陽歯車の角速度  $\omega_2$  はエンジンと同方向に回転していることになる。この状態では太陽歯車につながれた発電機が回転しているので、停車状態でエンジンが回転しているということは電池の充電に対するスタンバイ状態にある。プリウスではエンジンキーを入れればいつでも電動機 M で車をスタートできる状態になるが、このとき電池の充電状態が良くない場合エンジンが始動して充電を始める (3.2.5(a) で述べる)。

#### 3.2.2 前進状態

(a) エンジン停止 通常はエンジンキーを入れてもエンジンは止まっているので、この状態で発進するためには電動機 M を電池で駆動するモードが作動する (図6)。この時発電

機を空転（回転方向は負方向）させておくと、電動機 M の反力はキャリアに加わる。しかしキャリアにつながれたエンジンは逆転できない<sup>3</sup>ので、エンジン静止状態では電動機 M の回転はそのまま車両の駆動に使える。この運転状態は完全な電気自動車モードで通常はこの状態で発進する。このようにエンジンを始動しないまま電動機モードで走行する場合は J 特性図とは全く関係のないところで動くことになる。

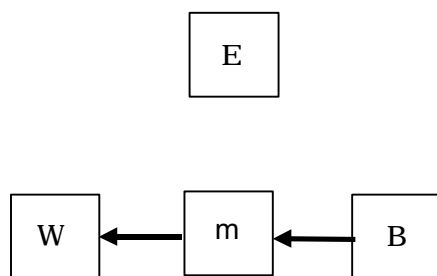


図 6 電気自動車モード

(b)エンジン稼働状態（ハイブリッドモード） エンジンが動いている状態（エンジン始動については3.2.5(b)に述べる）では発電機 G の負荷を増してその角速度  $\omega_2$  を減少させるか、あるいはエンジンの角速度  $\omega_3$  をあげて J 特性図上の  $\omega_2 / \omega_3$  の値（Y）を減少させると、運動状態は J 直線上を B 点から右下の方向に移動する。この時、車全体の動作点（ $\omega_1 / \omega_3$ ）は横軸を右方向に移動する。すなわちハイブリッドモードでの前進走行が実現される。ここでは動力流の形態は 1 型（図 7（a））であり、動力流の大きさは変速機に流れるほうがエンジンから遊星歯車を経由して車輪（出力）に向かうより大きい。そして縦軸（Y）の値、つまり  $\omega_2 / \omega_3$  が減少していくにしたがって、この二つの動力の配分比率は減少して行き、図 4 の C 点に達すると動力流の大きさは等しくなる。

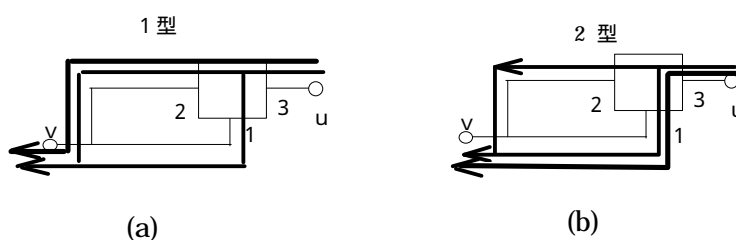


図 7 前進状態の動力図（ハイブリッドモード）

この時の値  $X_1$  は 2.2 節の動力分配の式において動力分配係数  $j_{v21v}^3 = 1$  で与えられる。ここで、先に定めたように  $j_{13}^2 = 4/3$  を考慮すれば、次の関係より

<sup>3</sup> この動作を確実にするために、図19のシステムでは一方向クラッチをもうけている。

$$\frac{W_1}{W_3} = \frac{1}{2} j^2_{13}$$

この場合  $W_1 / W_3 = 2 / 3$  が得られる。ここから先では動力は機械動力に変えられるほうが大きくなる (図 7 (b))。

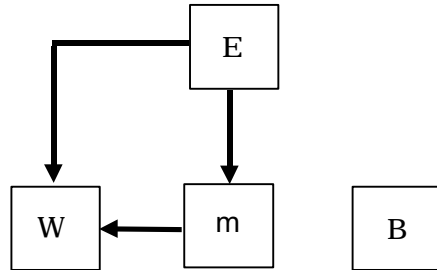


図 8 ハイブリッドモードのモニター画面

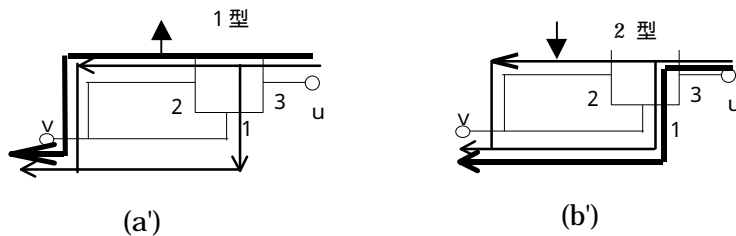


図 9 電池の関わるハイブリッドモード

この 1 型の動力流状態のとき (図 8) は発電機から電力を受け取って電動機は駆動されるが、発電機からの電力が不足するときは電池から供給されるモードもある。特に加速状態のときはこのモードが使われる。なかでも 2 型のときは無段変速機への動力は機械動力よりも少ないので電池からの補助電力は効果があると思われる (図 9 (b')、図 10 (b'))。逆に発電機の発電量に余裕のある時は電池に充電するモードがある。1 型のときがその状態である (図 9 (a')、図 10 (a'))。

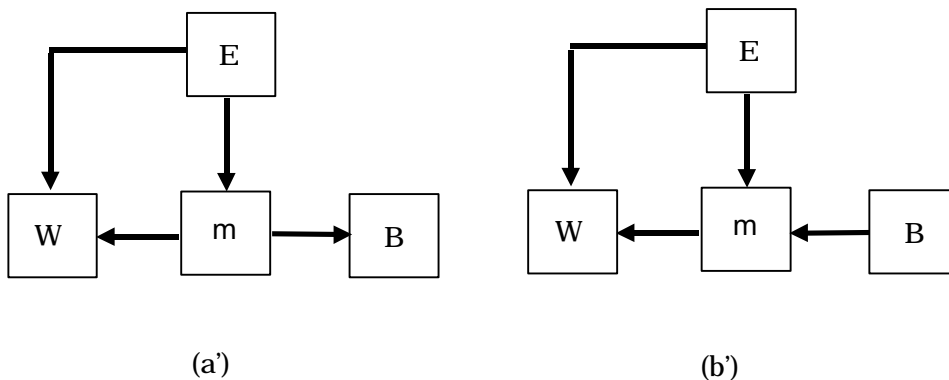


図 10 電池の関わるハイブリッドモード (モニター画面)

ハイブリッドモードのまま運転状態が C 点から D 点に達したとすると、ここでは太陽歯車、キャリア、内歯歯車のすべてが同一回転速度になり、共回り状態になる。ここから先 (D - E) はオーバードライブ状態であり、発電機 G の負荷を増して太陽歯車の角速度を下げることによって実現できる。このモードでも動力状態は 2 型であるので電池の補助があれば運転可能であるが、この領域まで使われているかどうかは不明である。しかし例えば高速状態での加速が必要なときに使うことはできる。

(c) エンジン駆動状態 (図 11) 車両の速度がある程度大きくなるとエンジンの単独運転でも燃費から見て、有利なモードが出てくるのでエンジンのみによる走行モードに切り替わる。それには電動機 M の回路を遮断して、発電機 G は正回転状態で負荷として電池に充電しながら走行する。このときはハイブリッドモードではなく J 特性は使われていない。

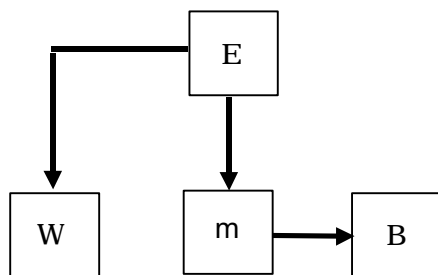


図11 エンジンによる駆動モード (モニター画面)

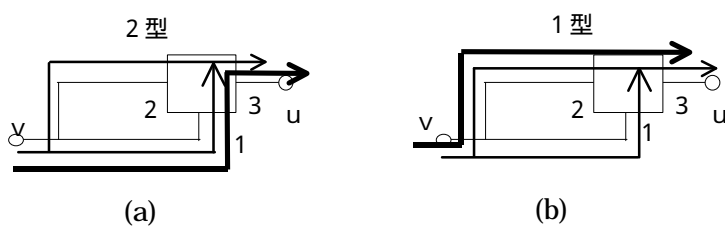


図 12 制動状態の動力流

### 3.2.3 制動状態

自動車を制動状態にした場合、この閉路型遊星歯車機構システムをそのまま使うと、この時は動力は車輪のほうから入ってくる。つまりシステムとしては入力結合型になり、車輪から入ってくる動力の出力はエンジンである。また運転状態は J 特性線の右方から左上りに B 点に向かい、その動力流の状態は図 12 のようになる。このような状態は無段変速機部分で電動機と発電機の役割が反転し動力が逆流することで実現される。すなわちスケルトン図で言えば駆動状態では電動機であった M が制動状態では発電機になり、発電機であ

ったGが電動機になることである。そしてJ特性図から前進状態（E - B）での制動は 型の動力流になる。このときはエンジンを出力端としているのでエンジンブレーキがかかる。

ところで電気自動車には回生ブレーキという機能がある。これは車の運動エネルギーを電気エネルギーに変換して電池に戻す方式であるが、この機構で言えば無段変速機構で発生する電気動力を電池に戻すことを意味する。しかしこの系では変換された電気エネルギーのすべてを電池に戻すためのエネルギーに使うことはできない。なぜならば車輪につながれている内歯歯車が減速していく（ $\omega_1 < 0$ ）ときには、エンジンが止まらない限り、太陽歯車を増速（ $\omega_3 > \omega_1$ ）していかなないとB点に到達できない。そのために減速時には発電機Gを電動機に切り替えて太陽歯車を駆動しつづけるため、エネルギーの補給を必要とする。つまりこのような状態で無段変速機を動作させる方式では制動時の回生電力量の多くを期待できないといえる。

そこで実際には制動時にはこの遊星歯車機構系は完全には使われず、無段変速機の電気回路を遮断し、その機能を止めて発電機Gを空転状態とする。さらにエンジンを停止し、電動機Mを発電機に切り替える。そしてここで発生した電力はそのまま電池の充電にまわす（図13、図14）。このときの遊星歯車機構は太陽歯車が無負荷状態のために自由に回転できるので、電動機Mは直接車輪から動力をとることができる。すなわち電気自動車モードでの回生制動である。この状態もまたJ特性と無関係である。

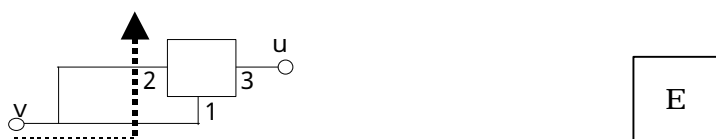


図 13 回生時の動力流

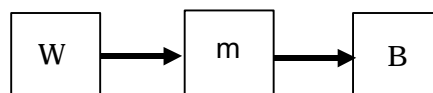


図 14 回生制動時のモニター画面

### 3.2.4 後退過程

車両が後退することは  $\omega_1$  が負になることであるから、J直線上のA-Bで表される領域が対象になる。この領域は 領域であるのでその動力流状態は図15(a)のように 型の動力循環が発生し、電気動力のほうが機械動力よりも大きくなる。しかしこれを実現するためには静止状態B点からA点へ動作点を移動させ  $\omega_2 / \omega_3$  を大きくしなければならない。このためには発電機Gは電動機Mへの動力供給を行いながら角速度を増す必要がある。しかし発電機は電力負担が大きくなれば減速するので、ここでの増速機能を発電機に期待することはできない。つまり後退領域（J特性線上のA - B）をこのような無段変速機で実現することは出来ない。



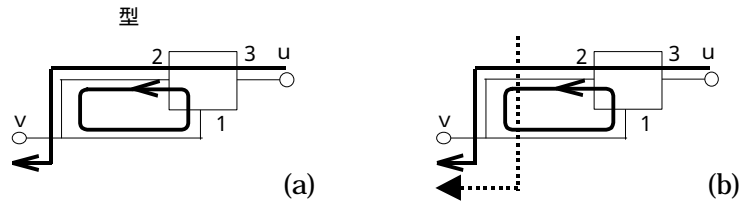


図 15 後退時の動力流

この領域を使うためには電池の助けを借りる方法がある。この場合は 型の動力が流れているところに系の外から動力を電動機に付け加えると、付け加わった動力は車輪に供給され、後退させることができる(図 15 (b))。しかしこの場合は動力循環はそのまま維持されるので全体としての効率は良いとは言えない。電池の残存容量が少なくなった場合には使えない。

効率よく後退させるためにはエンジンを停止したまま、電動機 M を逆転させて電池の電力で後退をさせる(図 16)。実際上の問題として後退時の動力状態はそれほど大きい動力を要求されないので、電池のみで後退をしても電池への負担は大きくないのでこのモードは不自然ではない。

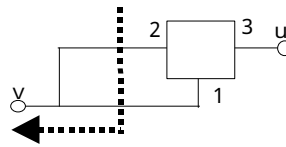


図 16 電池による後退

### 3.2.5 エンジン始動

このシステムでエンジンを始動する必要がある局面としては二つの場合が想定される。一つは完全に車が停止している状態でエンジンをスタートさせる場合であり、他の一つはエンジンを停止させ電動機のみで車が走行している電気自動車モードの途中で、エンジンをスタートさせる場合である。

(a) 停車状態でのエンジンスタート 車が止まっていてエンジンを始動する必要がある場面は、エンジンキーを入れたときに電池の充電量が足りないときである。この場合、エンジンを始動し電池に充電する。ここでは発電機 G を電動機に変え電池の動力によりエンジンを始動する(図 17 (a))。この時の回転は正方向にまわす必要がある。つまり発電機は正回転方向で電動機と発電機を使い分けなければならない。そしてエンジンを始動させるときには車は駐車ブレーキをかけ、電動機と内歯歯車は制動がかかっていることが前提である。もし駐車ブレーキが作用していないと車は後退するので危険ことになる。

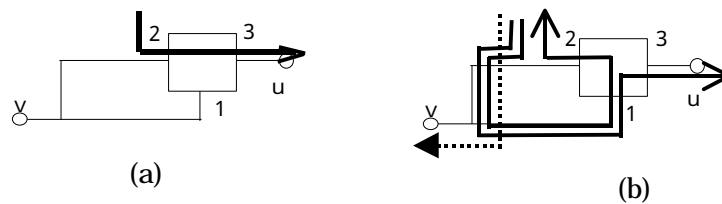


図 17 エンジン始動時の動力流

(b) 走行中のエンジンスタート 電気自動車モードだけでは急加速とか高速運転には対応できないので、走行中にエンジンをスタートさせる必要がある。この場合は負方向に空転していた発電機にブレーキを掛ければよい。そのためには発電機に電気負荷を加えることによってキャリアに繋がれたエンジンに始動回転を与えることができる。このようにすれば発電機の反力によってエンジンが始動する。しかし発電機に回転を与える電動機 M の動力は電池から与えられるので、このエンジンスタートの状態では電池からの動力は瞬間的に過大となる<sup>4</sup>。その動力流の状態を図 17 (b)に示す。ここで一旦エンジンが起動してその動力が確立すると図 7(a)の状態に移行し、ハイブリッドモードに変わる。

このようにエンジンスタート状態での発電機 G の役割は停車中では正回転方向での電動機モード、走行中では逆方向回転での発電機モードにする。しかしエンジンが始動すれば直ちに正転方向で発電機モードに切り替える必要がある。

### 3.3 他の遊星歯車機構による構成

この機構は J 直線で示される動作領域が 領域にあることから実現できた。しかしこの領域を実現できる遊星歯車機構は図 1 の 2K-H 型が唯一の解ではない。たとえば図 18 に示すラビニヨウ型の 3 端子を図のように選ぶとその J 直線は同じ領域を通過する。すなわちこの機構では基準伝達比  $j^{H32} = j^{132}$  は正で 1 より小さい。ここから伝達比の関係をを用いることにより  $j^{123}$ 、 $j^{213}$  はそれぞれ次のような値を持つ。

$$j^{123} > 1, j^{213} > 1$$

ここで  $j^{123}$  は特性図において J 直線が横軸を横切る座標であり、 $j^{213}$  は縦軸を横切る座標を示している。つまりこの J 直線は第 1 象限では 領域を通過し、プリウス方式と同じ特性を持つ機構を構成することができる。同じように 2 枚の外歯太陽歯車からなる 2K-H 型、あるいは 2 枚の内歯歯車からなる 2K-H 型、さらには 3K 型でもこれと同じ特性を持つ機構を構成することができる。どの機構を採用するかは周辺の条件で決まってくるものと考えられる。

最後にこの系の個々の要素の動作状態と、その作動状態モードを表に示した。

<sup>4</sup> プリウスの開発でもっとも難しかったのはこの時のショックを如何に滑らかにするかであったといわれている。

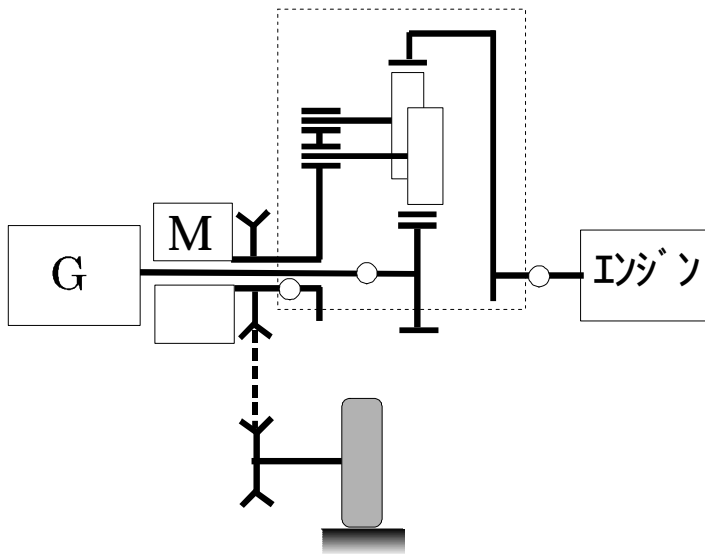


図 18 ラビニオウ型による構成例

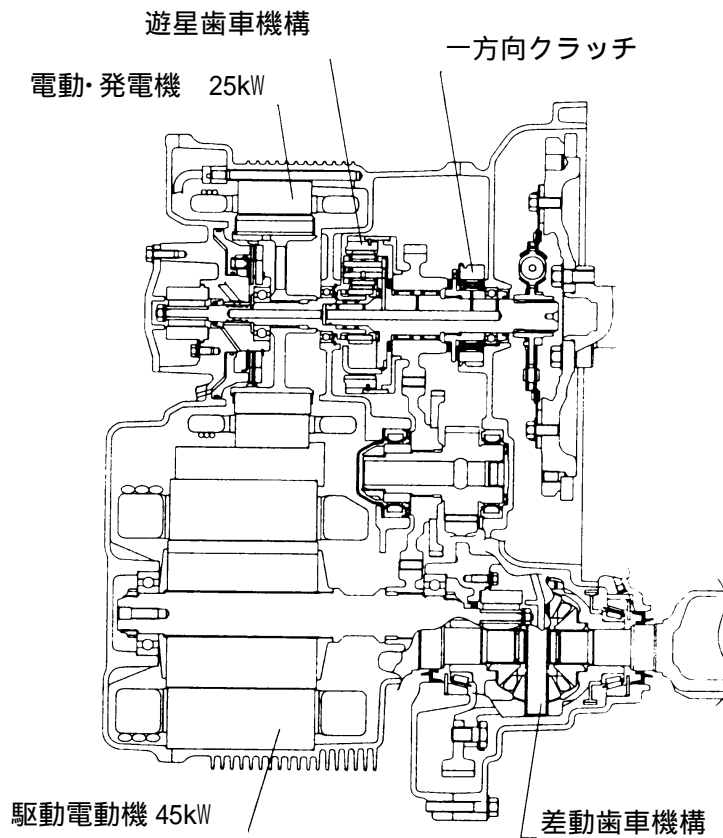


図 19 イスカサチ/アイソAWのハイブリッドエンジン

表 1 各要素の動作と車両の作動状態モードの関係

W	E	G	M	B	Mode
停車	停止	停止	停止		停車
	始動	電動	空転	放電	エンジンスタート
	駆動	発電	停止	充電	充電
前進	停止	空転	電動	放電	EVモード
	始動	発電(逆転)	電動	放電	エンジンスタート
	駆動	発電	電動		HVモード
	駆動	発電	電動	放電	HV(加速)モード
	駆動	発電	電動	充電	HV(充電)モード
	駆動	発電	空転	充電	エンジン走行
制動	制動	電動	発電		エンジンブレーキ
	停止	空転	発電	充電	回生制動
後退	停止	空転	電動(逆転)	放電	EVモード
	駆動	発電	電動(逆転)	放電	HVモード