

# 小型エンジントラックの駆動系を改良した HEV や EV の CO2 排出量予測

松尾典孝<sup>1)</sup>

## A Prediction of CO2 Emissions by HEVs or EVs with Modified Drivetrains of Engine Powered Delivery Truck

Noritaka Matsuo

The wave of EV shift is approaching delivery vehicles such as home delivery trucks, but it will be a heavy management burden for delivery companies to replace their engine vehicles with EVs. Therefore, we devised a modification in drivetrains of engine vehicles for gradually converting to HEVs and even EVs, then predicted CO2 emissions by the converted HEVs or EVs.

Key Words: power transmission, EV and HV system, drive train, transfer, motor drive system, charge/discharge, Simulation (A3)

### 1. まえがき

近年、宅配サービスの取扱個数は年々増加しており特に 2019 年以降の人々の生活様式の変化は増加に拍車をかけ国内統計によると 2020 年度の年間取扱個数は前年比 12% 増の 48 億個 (うちトラック運送が 99%) に達している。<sup>1)</sup> 一方日本政府は 2030 年温室効果ガスを 2013 年度比 46% 削減することを宣言し、トラック運送業界は日本経団連の低炭素社会実行計画に参画し 2030 年商用トラックのトンキロ当たり CO2 排出原単位を 2005 年度比 33% 削減することを目標に掲げそのために保有するトラックの次世代車への転換が必要としている。しかし全日本トラック協会 JTA によると商用トラックとして成り立つためには初期・ランニングコスト、燃料充填・充電時間およびインフラ、貨物車としての必要条件である積載量、耐久性などの条件を満たさなければならず現状ではディーゼルハイブリッド車 (以降 HEV) を除き、CNG 車、電動車 (以降 EV) とともにそれら全ての条件を満たせるものはない。<sup>2)</sup> 今後 CO2 削減目標を達成するためのロードマップが必要であるが新たな次世代車の導入だけでなく保有するトラックの改造と合わせて削減目標を達成できれば事業者の経営負担増を最小限に抑えることができる。またトラックの平均使用期間は 15 年と長く残存耐用期間の長い車両については CO2 排出低減のための改造を施した後、耐用期間を全うすることができれば SDGs の理念にも叶うことになる。

本報ではディーゼルトラックを HEV 化、さらに EV 化するために駆動系を 2 段階で改造する方法を検討しシミュレーションにより各々の CO2 排出低減量を予測する。

### 2. エンジン車の HEV への改造

・HEV はディーゼルエンジン車 (以降 ICEV) にモータ 1 基と動力分割機構を追加したパラレル方式とし、エンジン、AMT、デファレンシャルは ICEV のものを流用する。

・HEV の目標走行燃費は ICEV の 50% とし少なくとも事業者が保有する車両を全て本 HEV に改造すれば ICEV を使い続ける場合に比べ CO2 を 50% 削減できるものとする。

#### 2.1 駆動系構造と動力制御

現在 HEV トラックに採用されているパラレル方式の多くはクラッチを挟んでエンジンとモータを同一軸上に配し定速や加速時にクラッチを係合しモータ力行、減速時にクラッチを断絶しモータ回生により燃費向上を図るというものであるが ICEV に対する燃費改善率は高々 20%<sup>3)</sup> である。

これに対し更に大幅な燃費改善を得るためにエンジンを常に燃費 Sweet Spot で運転することを可能とする遊星歯車方式の動力分割機構を考案した

##### 1. 動力分割機構の構造

図-1 に動力分割機構の概念図を示す。エンジンは遊星キャリア軸を駆動しモータはサンギア軸を駆動する。リングギア軸は動力分割機構の出力軸であり AMT の入力軸となる。モータ軸上のギア 1 とギア 2 は軸に対し回転フリーでありモータ軸上をスライドするドッグクラッチ 5 と噛み合った方がモータと一体で回転する。ギア 1 はリングギア外歯と常時噛みあっておりリングギア外歯とギア 1 との歯数比はリングギア内歯とサンギアのギア比と同じとする。ギア 2 はカウンタギア 3 を介してサンギアと同軸のギア 4 と常時噛み合っている。ブレーキディスク 6 はギア 4 の側面に押し付けられることによりサンギア軸にブレーキを掛ける。スタータモータはエンジン車のものを流用する。

##### 2. 動力伝達制御

図-2 に動力分割機構での動力伝達モードを示す。

(a) EV モード: 車速が閾値以下、および閾値以上の車速における減速時に用いる。

1) 松尾技術士事務所 (436-0062 静岡県掛川市旭ヶ丘 1-15-12  
Email : mec-matsuo@mail.wbs.ne.jp)

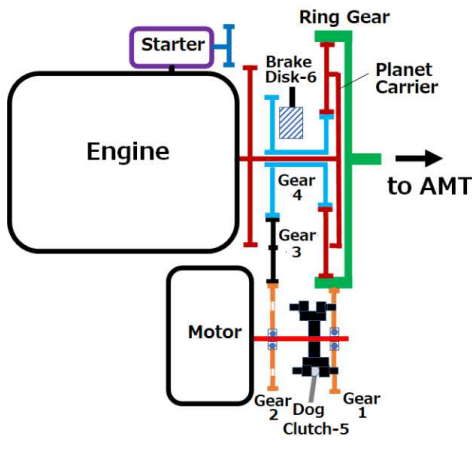


Fig.1 Schematic of Power Split Device

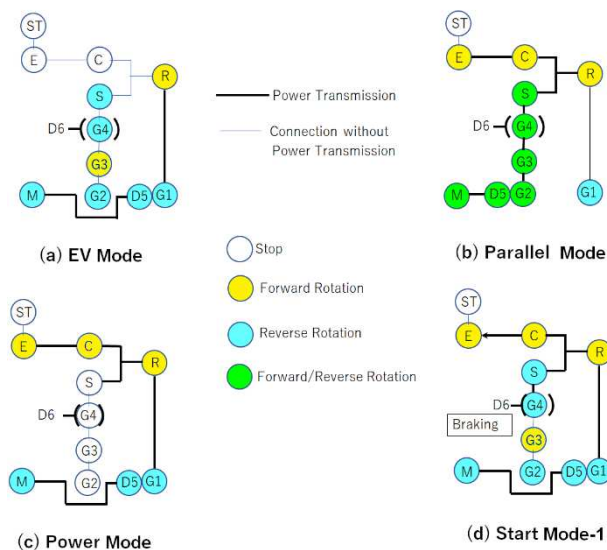


Fig.2 Power Transmission in Power Split Device

- (b) パラレルモード：車速が閾値を超えた時に用いる。但し減速時は(a)の EV モードに切り替える。エンジンは予め設定された燃費の Sweet Spot (回転数、トルク) で運転する。
  - (c) パワーモード：急加速など大きな駆動力を必要とする場合に使用する。ブレーキディスク 6 はギア 4 をロックしエンジンとモータは各々リングギアに対し固定のギア比で回転しながら合わせてリングギアに動力を伝える。
  - (d) スタートモード-1： EV モードで走行中ブレーキディスク 6 を空転しているギア 4 の側面に押し付けサンギア軸にブレーキを掛けると反力により遊星キャリアとエンジンがエンジン正転方向に回転を始める。
  - (e) スタートモード-2 (図略)：スタータモータを使う。低速走行中(d)の方法ではエンジン回転数が始動回転数に達しないか回転変動が大きいと判断した場合に使用する。
3. バッテリ充放電制御

動力分割機構に繋がる多段変速機のシフトパターンをバッテリー SOC により変更することでバッテリーの充放電を制御する。図-3 にパラレルモード走行時における遊星歯車

機構の共線図を示す。エンジンは正トルクを発生している時モータはこれと逆方向の負トルクを発生するよう制御することで遊星歯車機構のバランスがとれる。モータ回転数がゼロとなる時のエンジン回転数を  $N_{e0}$  とするとエンジン回転数  $N_e < N_{e0}$  の時モータは力行運転なのでバッテリーは放電し  $N_e > N_{e0}$  の時モータは発電運転なのでバッテリーは充電される。またリング回転数が高いと  $N_{e0}$  は大きく、低いと  $N_{e0}$  は小さくなる、つまり車速やエンジン回転数を変えながら走行する場合、同一車速でのリング回転数が低ければ充電時間が長く、リング回転数が高ければ放電時間が長くなる。したがって多段変速機を用いる場合、バッテリー SOC が低い時は High ギアで走行して充電基調に、SOC が高い時は Low ギアで走行して放電基調にすることでバッテリー SOC を許容幅内に制御することができる。

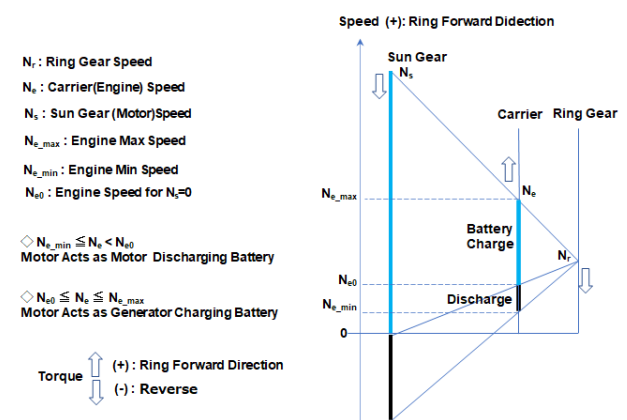


Fig.3 Diagram of Planetary Gear Device for the Parallel Mode

## 2.2 HEV の走行シミュレーション

### 1. 車両モデル

ベースとなる ICEV は宅配等の配送業務に用いられる最大積載量 2t の小型ディーゼルトラックバンとした。表-1、2 に車両および駆動系の主要諸元を、また図-4 にエンジンの BSFC マップを示す。

### 2. HEV コンポーネントの諸元

ICEV に追加されたコンポーネントの諸元を表-3 に示す。

Table-1 Specs. of Base ICEV

Parameter	Specs.
Vehicle External Dimensions	4845mmx1885mmx2770mm
Projected Front Area	5.0m <sup>2</sup>
Drag Coeff. / Rolling Coeff.	0.45 / 0.01
Vehicle Weight / Max. Payload	2400kg / 2000kg

Table-2 Specs. of Drivetrain of Base ICEV

Component	Parameter	Specs.			
Engine	Type	Inline-4 Turbo Diesel 2998cc			
	Max. Power	95kW/3000rpm			
	Max. Torque	300Nm/1300~3000rpm			
Transmission	Type	6-Speed AMT			
	Gear Ratio	1st	5.397	4th	1.474
		2nd	3.788	5th	1.0
		3rd	2.31	6th	0.701
Final Gear/ Tire	Gear Ratio/ R	4.111/0.365m			

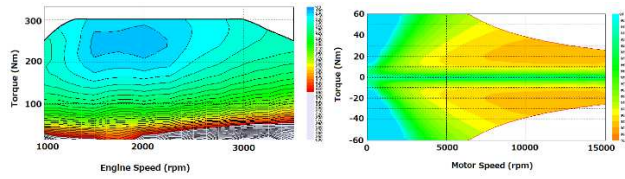


Fig.4 Engine BSFC Map

Fig.5 Motor Efficiency Map

Table-3 Specs. of HEV Components

Component	Parameter	Specs.
Vehicle	Weight	2495kg(ICEV+95kg)
Planet. Gear	Gear Ratio: Ring/Sun	4/1
Motor (PMSM)	Continuous Torque	60Nm
	Continuous Power	40kW
	Max. Speed	15000rpm
	Base Speed	6366rpm
LiB Battery	Volt. x Capacity	333V x 5.5Ah
Inverter	Efficiency	AC→DC 95% DC→AC 95%

(a) 遊星歯車機構

シミュレーションでは逆解析を用いるためパラメータはリングギア内歯とサンギアの歯数の比率のみを用いる。

(b) モータ

本システムではモータ性能は重要なパラメータである。  
 ・モータ最大トルク  $T_s$  と最大回転数  $N_s$  の要求値は遊星歯車機構の力学の式(1)、(2)から決まる。

$$T_s = -I / (1+a) \cdot T_c \text{-----(1)}$$

$$N_s = (1+a) \cdot N_c - a \cdot N_r \text{-----(2)}$$

但し、a:リングギア歯数/サンギア歯数比

$T_c$ : キャリアトルク  $T_s$ : サンギアトルク

$N_c$ : キャリア回転数  $N_s$ : サンギア回転数  $N_r$ : リング回転数

a=4、エンジン最大トルク  $T_c=300\text{Nm}$ 、エンジン最大使用回転数  $N_c=3,000\text{rpm}$ 、 $N_r=0\text{rpm}$  とすると  $T_s=60\text{Nm}$ 、 $N_s=15,000\text{rpm}$  となる。

・一方最大出力は EV 運転時の要求モータ容量から決めるが今回は 40kW とした。図-5 にモータ効率マップを示す。

(c) パラレルモードの変速パターン制御

今回の遊星歯車機構ではエンジンとモータが各々の最大動力と最大吸収動力を発生しながらリングギアを駆動する動作点が存在するがその時のリング速度を K 点と呼び変速点を決める際の基準点とする。K 点ではエンジン出力 95 kW のうちモータが 40kW を吸収して発電し 55kW がリング出力となる。リング速度が K 点より低いとリング出力が減り、これより高いとリング出力は増すがモータの発電量が減る。

K 点のリング速度  $N_K$  は (3)式で求めることができる。

$$N_K = ((1+a) \cdot N_c - N_s) / a \text{-----(3)}$$

但し  $N_c$  はエンジン最大出力回転数、 $N_s$  はモータ基底回転数 (3)式に  $N_c=3,000\text{rpm}$ 、 $N_s=6,366\text{rpm}$  を代入すると  $N_K=2,158\text{rpm}$  となる。ノーマル変速モードでは K 点で変速を行うことにすると変速機 M 速から M+1 速へのシフトアップ車速  $V_{su}(M)$ は(4)式で求められる。

$$V_{su}(M) = 0.12 \cdot \pi \cdot r_w \cdot N_K / R_f / R_r(M) \text{-----(4)}$$

但し  $r_w$ : タイヤ半径  $R_f$ : 最終減速比  $R_r(M)$ : M 速の変速比  
 また充電モードはこれより低い車速でシフトアップするよう変速点を設定する。変速パターンの充放電モードの切り替えはバッテリー SOC のレベルに応じて行う。(図-6)

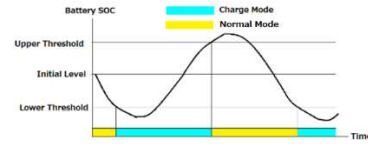


Fig.6 Switching Strategy of Transmission Shift Mode

3. 走行モード

トラック用走行モードには WHTC が適用されるが今回は宅配を想定したモードとするため車両停止頻度の高い JE05 の最大車速を 66km/h に変更した JE05 改モードとした。(図-7) またドライバが 1 人で 1 日に手渡して配達できる貨物の最大量を 1,000kg とした。

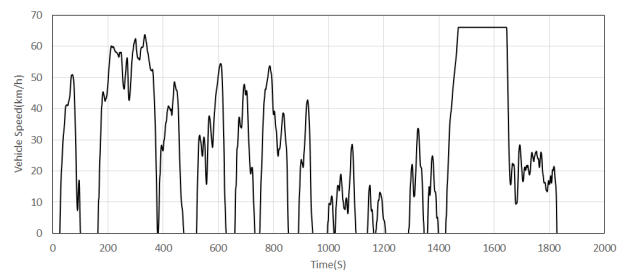


Fig.7 Modified JE05 Drive Cycle

4 シミュレーション走行結果

逆解析法による解析ツール<sup>4)</sup>を用いて ICEV と HEV の走行シミュレーションを実施した。走行燃費の比較を表-4 に示す。HEV は ICEV 比 48% の燃料消費量低減となった。

Table-4 Simulation Result of Fuel Economy in Drive Cycle

ICEV	HEV
9.34km/L	18.11km/L(△48%)

ICEV: with Idling Stop HEV: SOC Initial /Final 60% EV Mode Speed<16km/h

図-8 に両車のエンジン運転ポイント分布を比較する。HEV はエンジン始動時を除き常に燃費 Sweet Spot で運転されており、これが燃費低減の主な要因となっている。

図-9 に HEV の走行の時間履歴を示す。ノーマルモードで SOC が 55% を下回ったら充電モードに、充電モードで 65% を上回ったらノーマルモードに各々切り替えることで走行中 SOC を 50%~70% に制御出来ていることがわかる。

なお今回の逆解析では車両慣性質量や駆動系の等価慣性質量は考慮したもののエンジンやモータを含む動力分割機構要素の慣性モーメントや電力系の応答を考慮しておらず変速時やモータ回転方向切替時など状態遷移時の動力分割機構の挙動と制御、およびそれらが走行燃費に及ぼす影響については今後検討が必要である。

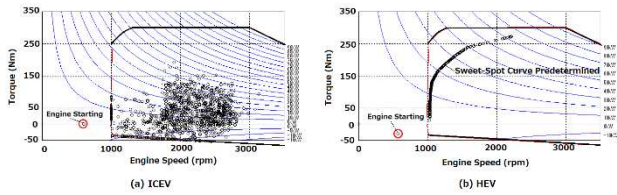


Fig.8 Distribution of Engine Operating Point

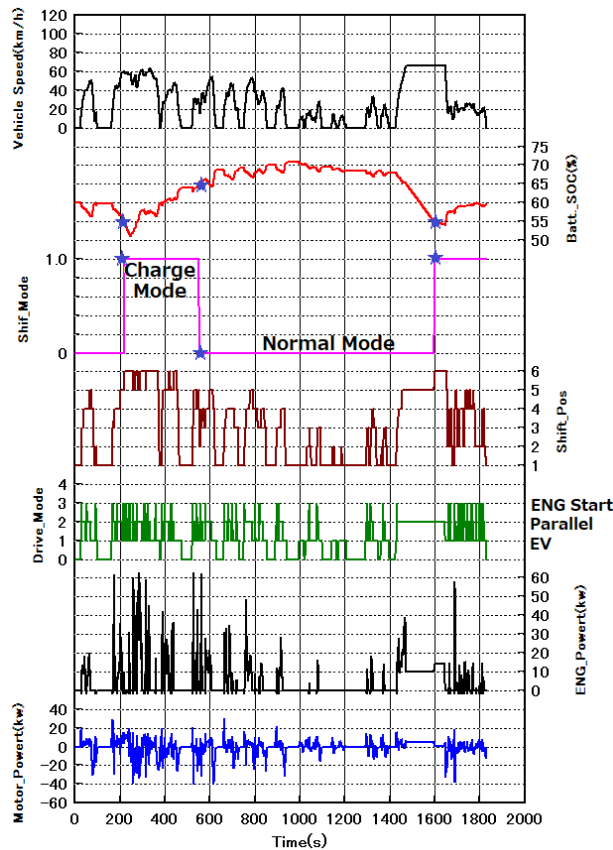


Fig.8 Time History of HEV in Drive Cycle

### 3. HEV の EV への改造

#### 3.1. EV への改造方法

・HEV のエンジンをモータに置き換えて 2 モータ EV とする。以降追加されたモータを T-Motor、HEV から使用しているモータを A-Motor と表記する。表-5 に改造 EV に関連するコンポーネントの諸元を示す。HEV と同等の走行性能を得るため T-Motor の出力特性はエンジンに合わせた。

なお既に遊星歯車機構をもつ 2 モータ EV に関する報告<sup>5)</sup>があるが、リングギアのないラビニヲ型遊星歯車を用い

Table-5 Specs. of 2-Motor EV Based on HEV

Component	Parameter	Specs.
Vehicle	Weight	2495kg
T-Motor	Continuous Torque	300Nm
	Continuous Power	95kW
	Max. Speed	3500rpm
	Weight	100kg
Battery	Capacity	60kWh

また同一諸元のモータを 2 基使用するのにに対し、本報の 2 モータ EV はリングギアを出力軸とし、しかも出力が大きく異なる 2 基のモータを使用する点が相違している..

・次に 2 モータ EV との比較のためモータ 1 基で変速機能のない減速機付きの専用 EV モデルも作成した。表-6 に諸元を示す。なお同表に記載以外の諸元は HEV に等しいものとした。

Table-6 Specs. of Specially Designed EV

Component	Parameter	Specs.
Traction Motor	Continuous Torque	600Nm
	Continuous Power	135kW
	Max. Speed	16000rpm
	Weight	100kg
Decelerator	Gear Ratio(Motor/Wheel)	14:1

図-10 に 2 モータ EV の T-Motor と専用 EV のモータの性能を示す。変速機のない専用 EV のモータは最大回転数/基底回転数の比率が大きく高速域での効率が低下している。

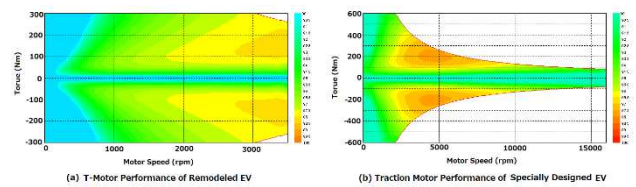


Fig.10 Traction Motor Performance

2 モータ EV で T-Motor 動力を  $P_T$ 、A-Motor 動力を  $P_A$ 、リングギア動力を  $P_R$  とし T-Motor の比率を  $P_{ratio}$  とすると

$$P_{ratio} = P_T / P_R = P_T / (P_T + P_A) \text{ ----- (5)}$$

走行中に瞬時の両モータの総電力損失 (含インバータ) を最少とするよう  $P_{ratio}$  を制御すれば走行電費を最少化できる。図-11 に平行、パワーモードの各モードでのリングギア回転数、トルク平面における最適  $P_{ratio}$  の分布を示す。

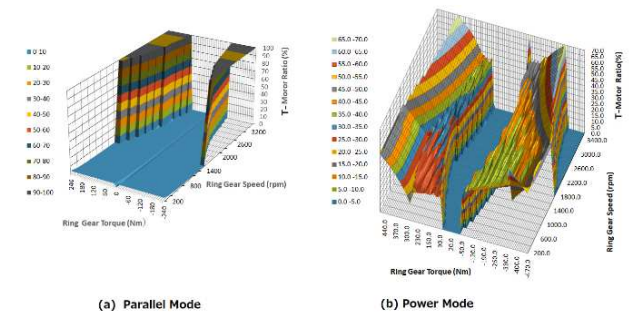


Fig.11 Optimum Power Ratio of T-Motor in 2-Motor EV

#### 3.2 EV の走行電費シミュレーション

2 モータ EV と専用 1 モータ EV の走行シミュレーションを実施した。2 モータ EV は平行とパワーモードの両モードで走行した。走行時の電費比較を表-7 に示す。

2 モータ EV のパワーモードでは 1 モータ EV に対し 9% 程の電費改善が得られた。また 2 モータ EV の動力モード比較では パワーモードの方が平行モードより電費が良いという結果となった。

Table-7 Electric Mileage in Drive Cycle

1-Motor EV	2-Motor EV	
	Parallel Mode	Power Mode
4.67km/kWh	5.06(△7.7%)	5.14(△9.2%)

今回の 1 モータ EV と 2 モータ EV の電費差の要因を調べるため 2 モータ EV の T-Motor 1 基と AMT を搭載した第 2 の 1 モータ EV の電費を求め先の 2 つの EV 車種と比較した。その結果 AMT による効果が 4.1%、2 モータの動力制御による効果が 5.1%となった。(表-8)

Table-8 Contribution Factors on Electric Mileage

EV Type	1-Motor	1-Motor	2-Motor
Motor	135kW	T-Motor	T-Motor & A-Motor
Transmission	w/o AMT	with AMT	with AMT
Electric Mileage	4.67km/kWh	4.87(△4.1%)	5.14(△5.1%)
Contribution Factor	-	AMT	Motor Control

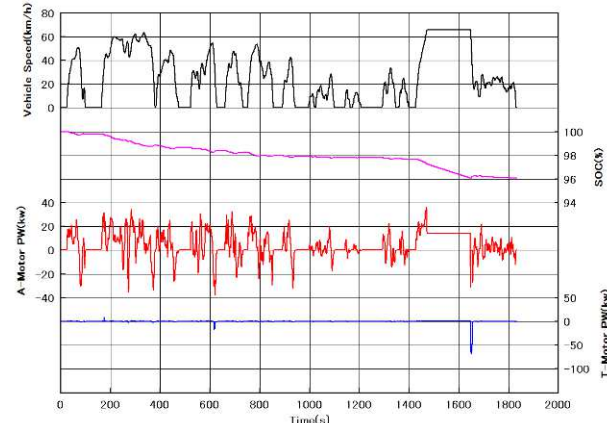


Fig.12 Time History of 2-Motr EV in Parallel Mode

今回 2 モータ EV ではモータ速度比が可変の平行モードは速度比固定のパワーモードより電費が劣る結果となったがその原因は以下のように考えられる。

図-11 よりいずれのモードでも T-motor の最適動力比率  $P_{ratio}$  がゼロに近い運転域が広く分布しており、図-12 から A-Motor のみで走行する時間が長いことがわかる。平行モードではその間 T-Motor は A-Motor のトルク反力を受け遊星歯車機構のバランスを保つために電力を消費するのに対しパワーモードでは T-Motor は電力を消費しない。

### 3.3 2 モータ EV に関する今後の検討課題

今回の 2 モータ EV は動力伝達系の主要基本諸元を ICEV から変更せず、T-Motor と A-Motor のトルク特性は HEV 化の段階で決めた。各モータのトルク特性およびリング軸上トルクに換算したトルク特性を図-13 に示す。両モータ特

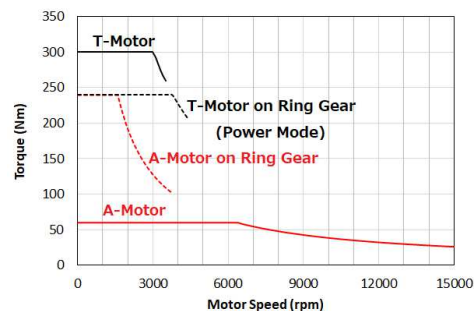


Fig.13 Torque Characteristics of the Two Motors

性の相対関係が 2 モータ EV にとって適切なものとなっているか、また電費を更に改善するため遊星歯車機構によるモータ速度比の連続可変制御と多段変速機による変速比の切替制御を組み合わせた最適制御法なども検討したい。

## 4. 改造 HEV と EV による CO2 排出低減予測

表-9 に J E05 改モード走行時の ICEV、HEV、2 モータ EV の 1km 当たりの CO2 排出量を比較する。

Table-9 Comparison of CO2 Emissions

ICEV	HEV	2-Motor EV
0.299kg/km	0.154kg/km	0.078kg/km

Diesel Oil : \*CO2 Rate=0.0775kg/MJ HI=43.4MJ/kg  $\rho$  =830kg/m<sup>3</sup>

Electric Power : \*CO2 Rate=0.4kg/kWh \*Well-to-Wheel Base

ICEV:HEV:EV の CO2 排出比率は約 4:2:1 となっており例えば保有するディーゼルトラックの 3/4 を HEV に 1/6 を EV に改造すれば CO2 排出量が 1/2 に低減される。

## 5. まとめ

1. 小型エンジントラックを HEV さらに EV に段階的に転換するための駆動系の改良方法を考案し改造 HEV や EV による CO2 排出量をシミュレーションにより予測した。
2. 駆動系を遊星歯車動力分割機構と変速機を用いたパラレル方式の HEV に改造することによりエンジンを常に燃費 Sweet Spot で運転することが可能となり宅配を想定したモード走行での燃費を 48%低減できるという結果を得た。
3. 2.の HEV のエンジンを駆動用モータに置き換えた 2 モータ EV により変速機能のない減速機のみでの 1 モータ EV に比べモード走行での電費を 9%低減できるという結果が得られた。
4. HEV では燃費向上効果の大きかった遊星歯車の軸速度比可変モードも 2 モータ EV では速度比固定モードに比べ電費が劣る結果となった。今後遊星歯車機構と多段変速機をもつ 2 モータ EV の最適制御について検討したい。
5. 最後に今回の改造 HEV の CO2 排出量はディーゼル車の 1/2、更に EV は HEV の 1/2 という結果となった。

## 6. 参考文献

- 1) 国土交通省：令和 2 年度宅配便取扱実績について、[https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha04\\_hh\\_000235.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha04_hh_000235.html)
- 2) 全日本トラック協会:カーボンニュートラルに向けた自動車政策検討会トラック運送業界における認識と課題, 2021
- 3) 奥井,新国:小型配送用ハイブリッドトラックの燃費調査および燃費改善の検討,自動車技術会論文集,Vol.45,No.2
- 4) MECWARE <http://www2.wbs.ne.jp/~mec/DRIVESIMCAT90.htm>
- 5) 中澤他：2 モータ EV システム技術の検討,自動車技術会秋季学術講演会予稿集(2019), 20204202