

# 電気自動車のパワートレイン制御の発展

吉本 貫太郎\*・羽二生 倫之\*\*

\*東京電機大学 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科 東京都足立区千住旭町 5

\*\*日産自動車株式会社 神奈川県厚木市岡津古久 560-2  
\*Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University, 5 Senju Asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo, Japan

\*\*Nissan Motor Co., Ltd., 560-2 Okatsukoku, Atsugi, Kanagawa, Japan

\*E-mail: E-mail: kantaro@mail.dendai.ac.jp

キーワード：電気自動車 (electric vehicle), 電動パワートレイン (electric powertrain), 車両制御 (vehicle control).

JL 0011/23/6211-0651 ©2023 SICE

## 1. はじめに

自動車産業が、100年に一度の変革として、自動車の電動化・知能化に取り組む中で、日産自動車では世界に先駆けて、2010年に電気自動車 (Electric Vehicle: EV または Battery EV, BEV) 「日産リーフ」の量産を開始した<sup>1), 2)</sup>。その後、多くの電気自動車が BEV 市場に参入し、競争力を維持するため、車両のモデルチェンジにあわせて電動パワートレインの性能を向上させ、またその制御も改良・発展させてきた。2016年には、BEVの電動パワートレインと駆動系を共用した100%モータ駆動の e-POWER を日本市場の「日産ノート」向けに登場させた。e-POWER はパワートレインの方式としてシリーズハイブリッドに分類されるが、ほかのハイブリッドシステムと差別化し、高い加速性能とアクセル操作性を、BEVの開発によって得られた電動パワートレインの制御によって実現している。現在では、BEVをはじめとして、100%モータ駆動の車両が数多く市場に投入されているが、電動パワートレイン制御の観点でまとめられた文献は多くない。本稿では、日産自動車における電動パワートレインの発展を事例として、BEVと e-POWER ともに示し、とくに量産車に採用された電動パワートレインの制御について述べる。

## 2. 電動パワートレインの概要とラインナップ

BEV, e-POWER, またハイブリッド電気自動車 (Hybrid Electric Vehicle: HEV) の駆動システム構成を図1に示す<sup>3)</sup>。e-POWER はシリーズハイブリッドとして分類されるハイブリッド形式であり、高い加速性能とアクセル操作性を BEV の開発によって得られた電動パワートレインの制御によって実現するとともに、発電制御により、エンジンでの発電騒音を感じにくい特徴をもち、従来のシリーズハイブリッドとの差別化を図っている。BEV と e-POWER ともに 100%モータ駆動のシステムであり、駆動輪はモータの出力が減速機を介して接続される。BEV と e-POWER の駆動モータ・インバータを共用することで、効率的に開発を進め、設備投資とコストの低減

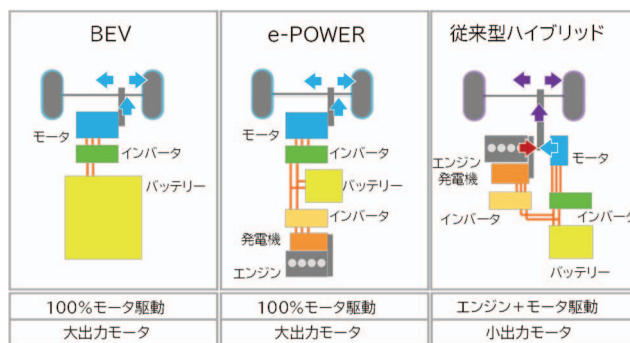


図1 電動パワートレインの駆動システム

BEV と e-POWER はモータ駆動のみで走行し、その駆動システム・制御を共用化することが可能。

表1 電動パワートレインのラインナップ

BEV	2010	2017	2019	2021	2022
リーフ	リーフ	リーフ	リーフ e+	アリア	サクラ
最大トルク [Nm]	280	320	340	300	195
最大出力 [kW]	80	110	160	160	47
バッテリー容量 [kWh]	24	40	62	66	20

e-POWER	2016	2018	2020	2020	2022	2023
フロントモータ	ノート	セレナ	ノート	オーラ	エクストレイル	セレナ
最大トルク [Nm]	254	320	280	300	330	315
最大出力 [kW]	80	100	85	100	150	120
リヤモータ			ノート(4WD)	オーラ(4WD)	エクストレイル(4WD)	
最大トルク [Nm]			100	100	195	
最大出力 [kW]			50	50	100	

が可能である。100%モータ駆動であることは、モータの高精度・高応答の制御のメリットが BEV と e-POWER でも得られ、車両のクイック・スムーズな加減速を実現している。また、e-POWER では、発電専用のエンジンはタイヤと接続されていないため、エンジンの最良燃費の動作点を集中的に利用することで燃費向上を図れるだけでなく、エンジンによる発電のタイミングを選択する自由度も高い。e-POWER の発電制御では、ロードノイズが大きくなる車速条件や、路面粗さの推定によってエンジンによる発電の制御を行うことで、BEV のような静粛性を実現している。表1は BEV と e-POWER のラインナップを示している。BEV は日産リーフのモデルチェンジとともにバッテリー容量の向上、モータ・インバータの性能向上を実現し、日産リーフを通じて得られた知見・経験をもとに、新しいプラットフォームをもつ SUV (Sport Utility Vehicle) の BEV として日産アリア、ま

た、軽自動車のBEVとして日産サクラへと発展させた。これらの電動パワートレインは、バッテリー、モーター・インバータ、充電器をそれぞれの車両の性能・仕様に適した部品を搭載し、電動パワートレインの制御は共用させながら改良・発展させ、それぞれの車両に合わせて制御の適合を行っている。

図2に日産リーフと日産アリアのモーターの外観を示す<sup>4)</sup>。日産リーフは高効率かつ高トルク・出力を備える埋込み磁石型同期モーター (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM) を駆動モーターとして採用し、ステータ巻線やロータの磁石配置などを改善し、モーターのコア径は同一としながら、軸長を変えることで、e-POWERも含めたさまざまなラインナップに対応している。日産ノートは、第一世代から第二世代の進化の中で、駆動モーターを85kW、280Nmに向上しながら、モーターの軸長18%減、機電一体の電動パワートレインのユニットとしてサイズ15%減を実現した。

日産アリアでは、新たに開発した巻線界磁同期モーター (External Excited Synchronous Motor: EESM) を採用した。ロータの励磁電流を制御することによって、低トルク領域における電磁加振力を低減することができ、緩

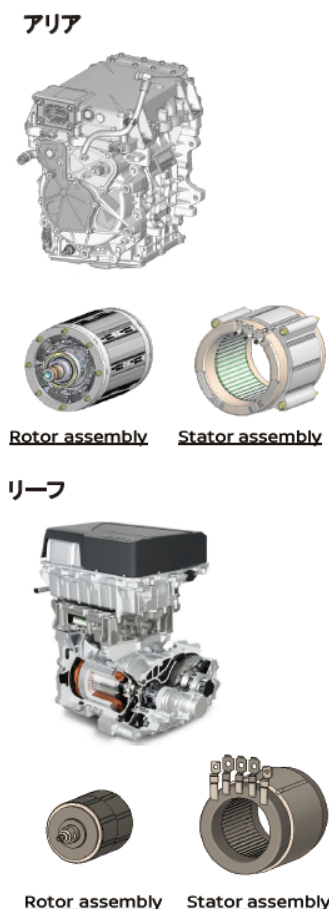


図2 リーフとアリアのモーター  
BEVとe-POWERどちらも100%モーター駆動のパワートレインであり、駆動力制御を共通化でき、BEVで開発した制御を活用できる。

加速や巡行など、駆動力要求が大きいシーンでの静粛性を向上している。また、重希土類元素のコスト・供給リスクを低減できることも特徴である。

### 3. 電動パワートレインの制御

#### 3.1 電動パワートレインのシステム構成

BEVとe-POWERの電動パワートレインの制御システム構成図をそれぞれ図3に示す<sup>5)</sup>。これらの中心となるコントローラがVCM (Vehicle Control Module) であり、たとえば、車両のアクセルペダルや車両速度、バッテリーの充電状態 (State of Charge: SOC) などをもとに駆動力を制御し、インバータに搭載されるMC (Motor Controller) にCAN (Control Area Network) を用いてモーターのトルク指令値を送信する。この電動パワートレインの部品群とVCMはEV-CANというネットワークを構成し、VCMは車両側のECU (Electric Control Unit) が接続されるV-CANとEV-CANとの情報のゲートウェイとしての役割も果たす。図3にDriving sub systemとして示されるBEVとe-POWERの駆動力制御は、電動パワートレインのECUであるVCMとMC、またBMS (Battery Management System) によって構成され、BEVとe-POWERが共に100%モーター駆動であることから、これらの制御を共通化することができる。BEVの充電制御とe-POWERの発電制御は、それぞれのアプリケーションとして制御開発を行い、電動パワートレインの種類に応じて選択している。

共通化された駆動力制御について以下に説明すると、MCはトルク指令に基づいて、検出したモーター電流から、インバータの各半導体スイッチのOn/Offを操作することによってモータートルクを実現する。MCはインバータのキャリア周波数での高速なフィードバック制御が可能であり、この高速な制御の特徴を活かし、駆動軸ねじり振動抑制やバックラッシュ振動抑制などのモータートルク制御が実現されている。一方で、VCMではクイック・スムーズな加減速制御を実現するトルク指令値を生成し、ブレーキとモータートルクの協調制御を実現するそれぞれの指令値の生成や、巡行時の損失を低減する制御などの

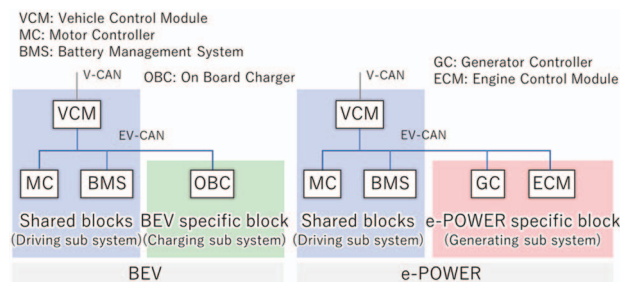


図3 電動パワートレインの制御システム構成図  
BEVとe-POWERどちらも100%モーター駆動のパワートレインであり、駆動力制御を共通化でき、BEVで開発した制御を活用できる。

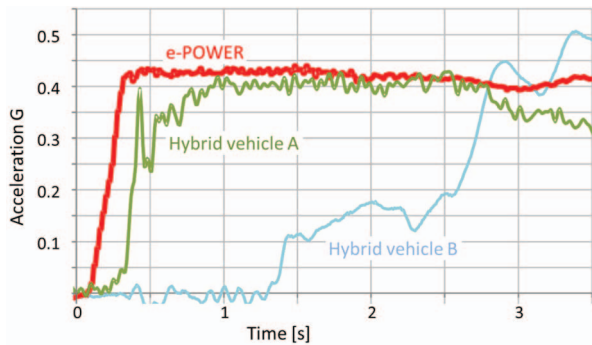


図4 発進時の加速プロファイル (全開加速)  
アクセルペダルの踏み込みに対して、高い応答性とスムーズな加速性を BEV と同様に e-POWER でも実現。

機能をもち、駆動力の制御の中でも、VCM・MC の特徴を活かして機能を分担させている。これらの駆動力の制御が BEV と e-POWER で共用されることで、BEV で開発・発展した機能は e-POWER に活用され、また e-POWER で開発された機能を BEV に採用することも可能であり、相互に進化・発展することができる。図4 は e-POWER 車の発進時の加速プロファイルを示し、車両の加速性能として重力加速度に対する比を G として表わしている<sup>6)</sup>。e-POWER 車ではほかの HEV 車と比較して、0s でのアクセルペダルの踏み込みに対して高い応答性を示し、またスムーズな加速を実現している。このことはアクセルペダル操作に対して、遅れが少ない、リアリティが高く、操作性の良い車両であることを意味しており、運転の不慣れなドライバーにも運転のしやすさという価値を提供している。

### 3.2 グライディング制御による巡行時の効率改善

中高速域で巡行するシーンでは、ドライバーが微小なアクセル操作により不要な加減速を行うことで、モータ効率の低い領域での力行・回生の繰り返しを生じ、モータ損失を増加させてしまう。この課題に対して、車速に応じた巡行に必要な駆動力付近ではドライバーの微小なアクセル操作をキャンセルし、モータの損失を低減させるグライディング制御<sup>7), 8)</sup>が BEV と e-POWER に採用されている (図5)。グライディング制御により、日産リーフでは実用航続距離を約 6% 向上させた。

### 3.3 電動 AWD [e-4ORCE] による駆動力制御

前後輪独立のモータ駆動による電動 4WD (四輪駆動) は e-POWER の日産ノートに採用され、前後駆動力を制御することで車両のピッチング制御を実現している。図6に示すように、前輪・後輪のモータを回生制動する際に、その制動力の差を制御することで回生制動時の車体姿勢の変化を抑え、フラットかつスムーズな快適な乗り心地を提供できる。この電動 4WD を発展させ、モータによる駆動・回生に加えて各輪の油圧ブレーキも組み合わせ合わせた制御として電動 AWD (All Wheel Drive) 制御である「e-4ORCE (フォース)」を開発し、「e-4ORCE」

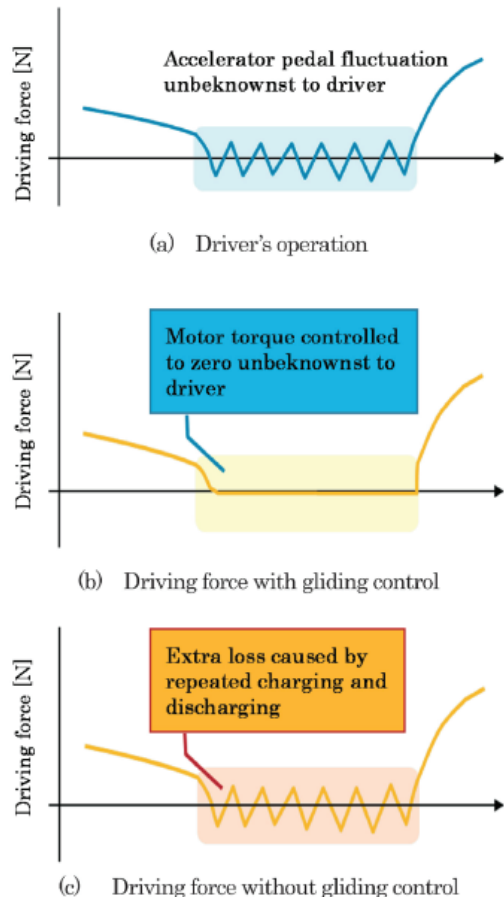


図5 グライディング制御時の駆動力イメージ  
力行・回生の微小な繰り返しをキャンセルすることでモータ損失を低減する。

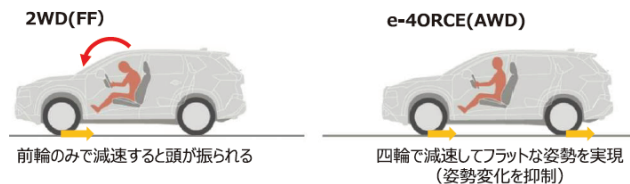


図6 ピッチコントロールによる車体姿勢の違い  
前輪と後輪それぞれのモータの回生ブレーキの制動力差を制御することでピッチ挙動を最適に抑える。

は BEV の日産アリア、また、e-POWER の SUV であるエクストレイルに採用されている<sup>9)</sup>。「e-4ORCE」では、輪荷重の変化によるタイヤグリップ力の限界内でタイヤのグリップ能力が最適となるように駆動力を前後輪に配分し、車両のコーナリング性能を高め、さまざまな路面状況においても高い安定性を実現している (図7)。

### 3.4 駆動モータ制御を用いた軸ねじれ振動抑制

日産電動パワートレインの特長の1つであるクイック・スムーズな加速応答を実現する制御のコア技術として、駆動モータ制御による軸ねじれ振動の抑制が挙げられる。初代日産リーフの開発前から、モータ制御技術として開発が進められ、採用後も進化・改良が続けられている。図8に駆動モータトルク指令をステップで与えた場合と、軸

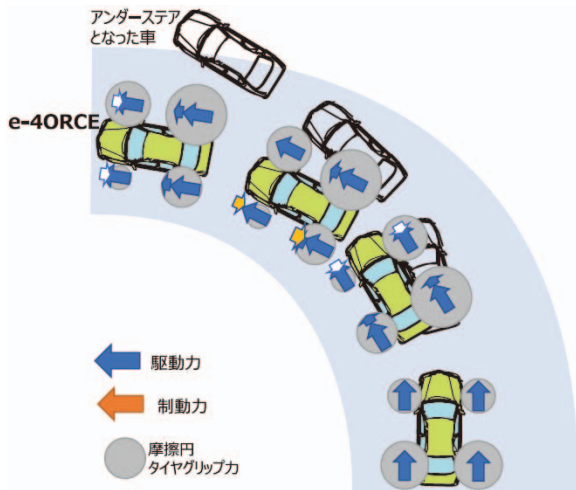


図7 旋回時のタイヤグリップ能力と駆動力配分

輪荷重変化によるタイヤグリップ力の限界が摩擦円の大きさと示され、その限界内でグリップ力が最適となるよう駆動力の前後配分と状況に応じてブレーキによる制動力を制御。

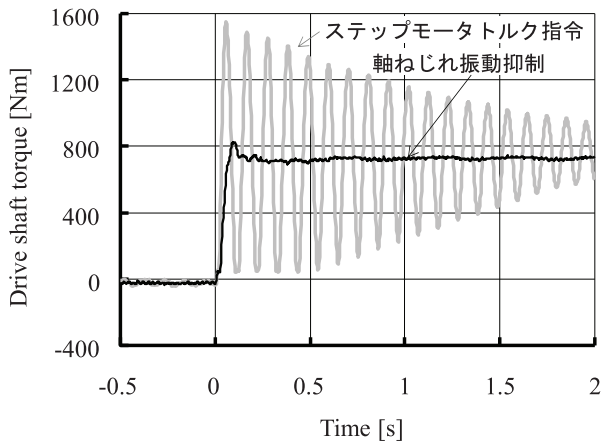


図8 トルクステップ時の軸ねじれ振動抑制の効果

モータトルクをステップで与えた場合の軸ねじれ振動を制御によって低減。

ねじれ振動抑制の比較を示す<sup>10)</sup>。モータの出力軸とタイヤの間のドライブシャフトのねじり剛性によって、モータトルクに対するモータ角速度の応答は、およそ8~10 Hzに顕著な共振特性をもつ。緩やかにモータトルクを変化させれば、ねじり振動を抑えることができるが、加速応答を低下させてしまう。このトレードオフ課題に対して、図9に示す軸ねじれ振動抑制では、駆動トルクの伝達系と車両運動をモデル化し、共振特性をもたない規範応答と伝達特性の逆系からフィードフォワード補償器を設計し、ロバスト性を高めるためにフィードバック補償器を併用している<sup>11)~13)</sup>。

この軸ねじれ振動抑制をもとに、日産リーフでの「e-Pedal」の採用の際に、図10に示す駆動モータの回生と力行の切替時のギアにおけるバックラッシュ特性も考慮した制御へと発展させた<sup>14)</sup>。「e-Pedal」はアクセル操作のみで発振・加速・減速・停止を行える機能であり、アク

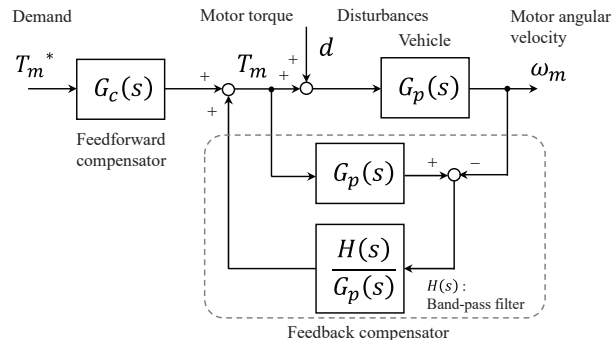


図9 軸ねじれ振動抑制の制御ブロック図

トルク指令値をもとに、フィードフォワード補償器とフィードバック補償器による軸ねじれ振動抑制制御。

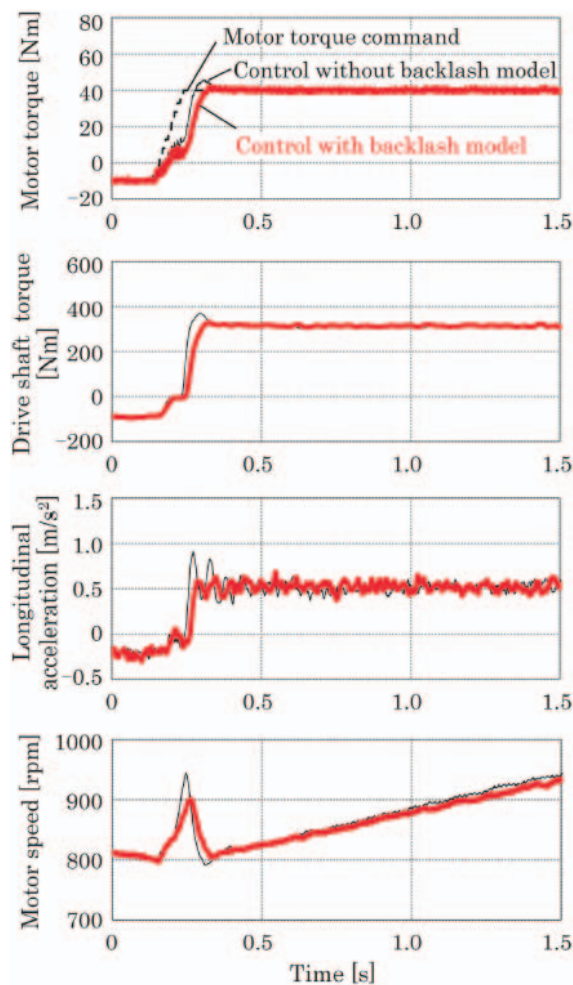


図10 減速から加速時の駆動軸ねじり振動制御実験結果（バックラッシュ特性考慮有無の比較）

ギアバックラッシュ特性を考慮することで減速から加速時に切り替わる際の振動を改善。

セルペダルとブレーキペダルの踏み替え操作を減らすことで運転操作の負荷を低減することができるもので、進化した「e-Pedal Step」が日産アリアやe-POWERの車両に採用されている。

## 4. まとめ

BEVとe-POWERの電動パワートレインは駆動システムを共用でき、双方の進化を相互に採用することが可能である。駆動モータ・インバータの共用だけでなく、電動パワートレインの制御は、駆動力制御・モータ制御の階層それぞれを共用化することで、100%モータ駆動の魅力と価値を広く提供することに貢献している。

(2023年8月3日受付)

### 参考文献

- 1) S. Nakazawa and N. Nakada: The Nissan LEAF electric powertrain, *32nd International Vienna Motor Symposium* (2011)
- 2) H. Shimizu, T. Okubo, I. Hirano, and S. Ishikawa: Development of an Integrated Electrified Powertrain for a Newly Developed Electric Vehicle, SAE Technical Paper 2013-01-1759 (2013)
- 3) 仲田: 成長する e-POWER システムの特徴と今後の発展, 日産技報, No.87, 43/46 (2021)
- 4) 大久保, 和田: ARIYA の性能を実現する新開発モータ, 日産技報, No.88, 69/72 (2022)
- 5) K. Yoshimoto and T. Hanyu: NISSAN e-POWER: 100% Electric Drive and Its Powertrain Control, *IEEEJ Journal of Industry Applications*, **10**-4, 411/416 (2021)
- 6) 木村, 風間, 河合, 向, 關, 衛藤: 新世代ハイブリッドパワートレイン “e-POWER” の開発, 日産技報, No.80, 6/14 (2017)
- 7) 關, 吉本, 黒澤, 島村: 新型電気自動車の電動パワートレイン, 自動車技術会学術講演会予稿集 (秋), 1475/1480 (2017)
- 8) 關, 黒澤, 吉本, 島村: 新型日産リーフの電動パワートレイン制御システム, 日産技報, No.82, 16/22 (2018)
- 9) 片倉, 鈴木: 本格 SUV への e-4ORCE 適用, 日産技報, No.89, 21/24 (2023)
- 10) 小野山, 吉本: 日産電気自動車用パワートレインの進化, 日産技報, No.82, 3/7 (2018)

- 11) T. Karikomi, K. Ito, and T. Okubo: Development of the Shaking Vibration Control for Electric Vehicles, *SICE-ICASE International Joint Conference* (2006)
- 12) H. Kawamura, et al.: Highly-Responsive Acceleration Control for the Nissan LEAF Electric Vehicle, SAE Technical Paper 2011-01-0397 (2011)
- 13) 福永, 伊藤, 菊込, 久米, 川村: 日産リーフ向け高応答加速度制御の開発, 日産技報, No.69・70, 16/20 (2012)
- 14) 大野, 澤田, 小松, 藤原, 中島: モータ制御によるバックラッシュ振動の抑制, 日産技報, No.82, 23/29 (2018)

### [著者紹介]

よしもと かんたろう 君  
吉本 貫太郎 君



1999年横浜国立大学大学院博士課程前期修了。JR東日本を経て、2001年日産自動車株式会社入社。在職中の2010年横浜国立大学大学院博士課程後期修了。2020年4月より東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科准教授。2022年同教授。パワーエレクトロニクスおよび電動モビリティの研究に従事。博士(工学)。

はにゅう ともゆき 君  
羽生 倫之 君



1998年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程前期修了。2001年日産自動車株式会社入社。電気自動車・e-POWERなどの電動車のパワートレイン制御開発と燃費動力性能の開発、車両開発を主導し、現在パワートレイン・EVシステム開発に従事。自動車技術会会員。