

EVミニカートレースを通じた電動制御技術／シミュレーション技術の向上

Electric control & simulation technology improvement through EV mini cart racing

鷹野 雅一 藤原 朝記 友岡 祐弥 白澤 樹 鈴木 聖也

Abstract

Currently, the uptake of EV's (Electric Vehicles) is accelerating against the backdrop of an era aiming for a recycling and carbon-free based society.

In order to develop more competitive EV's, it is important to have electric control technology that can bring out the best performance from each component such as the motor and battery. It is also therefore necessary to combine each component and continue to progress with the development over shorter periods while improving total performance. For this purpose, simulation technology using model-based development/design(MBD)- which has been a great focus of attention mainly in the automobile industry in recent years - can be very effective.

In order to acquire and improve the electric control and simulation technology using MBD, the company participated in an EV minicar race, in which teams competed for a number of laps with a cart kit that is simpler compared to the commercially available passenger car type EV. The company was able to achieve an overall victory in a 2020 tournament.

In this article, we will introduce the work and results of the technology that led to this victory.

1 はじめに

現在、循環型社会、脱炭素社会を目指す時代の流れを背景にEV(Electric Vehicle)の普及が加速している。

競争力のあるEVを開発するためには、モータやバッテリーなどのコンポーネント単位で最高のパフォーマンスを引き出せる電動制御技術が重要である。また、各コンポーネントを結合し、トータルパフォーマンスを向上させながら短時間で開発を進めることも必要である。それには、近年、自動車業界を中心に注目されているモデルベース開発(MBD:Model Based Development/Design)を用いたシミュレーション技術が有効である。

当社では、電動制御技術とMBDを用いたシミュレーション技術を獲得・向上するために、市販の乗用車型EVに比べてシンプルなカートキットで周回数を競うEVミニカートレースに参戦した。そして、2020年の大会で優勝を達成することができた。

本稿では優勝に至った技術への取り組みと結果について紹介する。

2 EVミニカートレース

EVミニカートレースとは、CQ出版社主催で開催されている大会である。このレースは、『同一仕様のモータ、車体、電池を用い、モータ設計技術、制御技術の違いにより、30分間の走行距離を競う』というものであり、シンプルな構造のカートキットを使ったワンメーカーレースである。

表1に競技ルールのポイント、図1にEVミニカート車両のシステム構成を示す。

表1 競技ルールのポイント

(1)バッテリー	完全密閉型鉛バッテリー 個数:2個以内 重量制限:3.0kg以下/個
(2)モータ	CQ出版社提供のモータキット、ケース変更不可、銅線の巻き方・線径は規定なし
(3)モータコントローラ	規定なし
(4)駆動・タイヤ	減速比:変更可能、タイヤ:変更可能 ※リムの変更禁止
(5)車体	CQ出版社提供のカートキットとする 機構的/構造的改造禁止

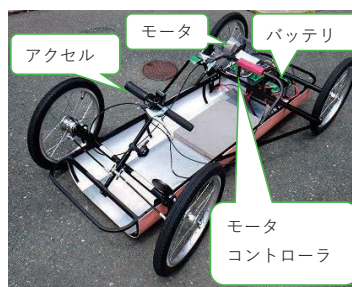
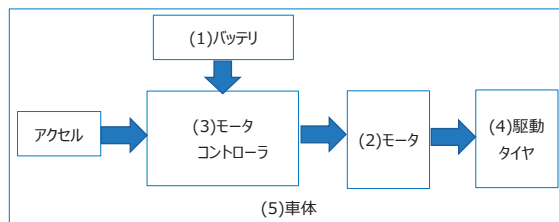


図1 システム構成

優勝のための目標周回数は、2018年大会¹⁾の優勝チーム周回数が約8周だったため、9周と設定した。

1) 2019年ではなく2018年を目標対象にした理由は、2019年大会はカウルあり、2018年と2020年はカウルなしと競技ルールが異なるためである。

3 各コンポーネント

目標周回数を達成するために、大小様々な工夫をこらしたが、ここでは、主なものであるバッテリーのセッティング、モータ仕様の選定、モータコントローラ(モータ制御)について述べる。

3-1. バッテリーのセッティング

鉛バッテリーは40℃前後で最も効率的に充電できる。そこで、バッテリー全体を発泡断熱材で囲って保温し、充電による自己発熱の温度上昇を利用して40℃前後に維持することで、より多くの充電ができるようにした。図2に鉛バッテリーの充電方法の違いによる充電量を示す。保温充電により12Wh(27%)の充電量増加を実現した。

充電方法	充電量	①-②
①保温充電	約 56 [Wh]	12[Wh]
②室温充電	約 44 [Wh]	

図2 鉛バッテリーの充電方法による違い

3-2. モータ仕様の選定

モータには、負荷トルクが大きくなると回転数が下がる基本的な特性がある。レースに勝つためには、「コースの最大傾斜を上りきれるトルク」と「最高速を出せる回転数」を両立させるモータパラメータ(モータ径、モータ長、磁石、巻き線の太さ、巻き数、巻き方など)を見つけ出す必要がある。しかも、限られたバッテリー充電量(電流消費)で、30分間走りきらなければならない。

図3にモータの概要を示す。競技ルールでは、巻き線の太さ、巻き数、巻き方が変更可能であるが、組み合わせは数十通りにも上る。実モータをいくつも作り、最適な組み合わせを見つけ出すには多大な時間とコストを要する。そこで、電磁解析ソフトJMAG²⁾を用いたシミュレーションにより、考えられる巻き線の太さ、巻き数、巻き方の組合せ44種類をシミュレーションし、目標回転数(速度)が達成できる8種類にモータ仕様に絞った。8種類の中から、最高速と駆動力が高く、かつ巻き線の太さと巻き数を手巻きで自作することが可能な2つの候補に絞り込んだ。この2つの候補は、トルク重視の組み合わせ①と回転数重視の組み合わせ②となった。

2) JMAG は株式会社 JSOL の商標

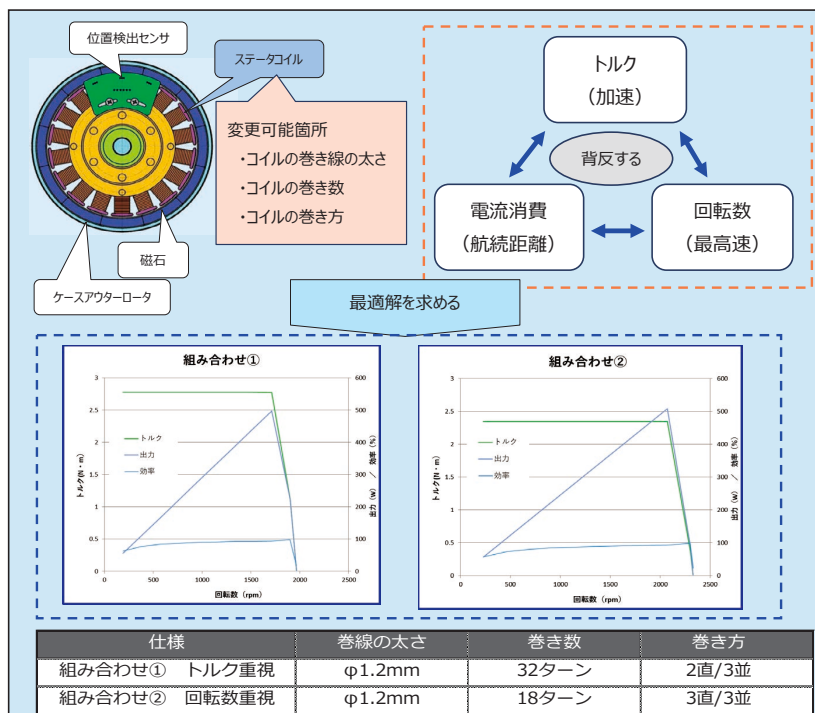


図3 モータの概要

3-3. モータコントローラ(モータ制御)

モータ制御は、モータ通電方式の違いによって効率が異なる。120°通電、180°通電というモータ通電方式は、当社として実績があるが、より効率の良い制御方式を探していたところ、150°通電方式^[1]を見つけた。当社としては、新たな取り組みになるが、この方式にチャレンジすることにした。また、追い越しなどの一時的な加速のために、進角制御を織り込んだ。この制御は、ドライバーの手元のスイッチでON/OFFすることで、作動／停止できるようになっている。

4 MBDを用いたレースシミュレーション

30分間での周回数をシミュレーションするために、図4のようなレースシミュレーションモデルを構築した。以降でこれらのモデルひとつひとつについて説明する。

4-1. モータモデル

モータモデルは、車両速度とバッテリー電圧を入力とし、モータで消費される電流とトルクを出力とした。モータで消費される電流は、モータの回転により発生する起電圧とバッテリー電圧の電位差により決定される。トルクはモータで消費される電流により算出される。そのため、モータモデルは「回転数とバッテリー電圧に応じた電流テーブル」と「回転数とバッテリー電圧に応じたトルクテーブル」からモデル化した。

図5にモータモデル化の流れを示す。モータはJMAGの解析結果をもとに製作したが、手巻きで自作しているため、解析結果と実機において性能に差異がある。そのため、モータベンチにて手巻きモータの性能測定を行い、測定結果をモデルに反映した。

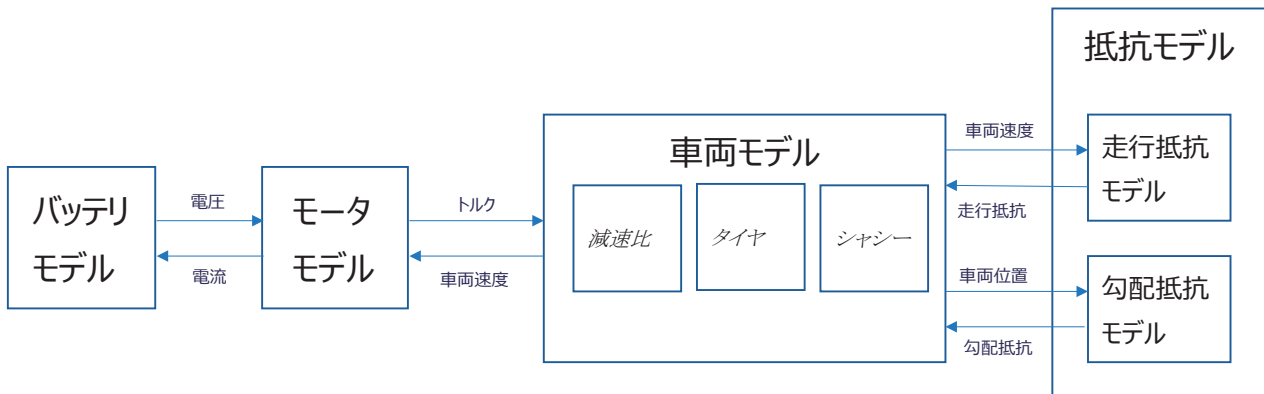


図4 レースシミュレーションモデル

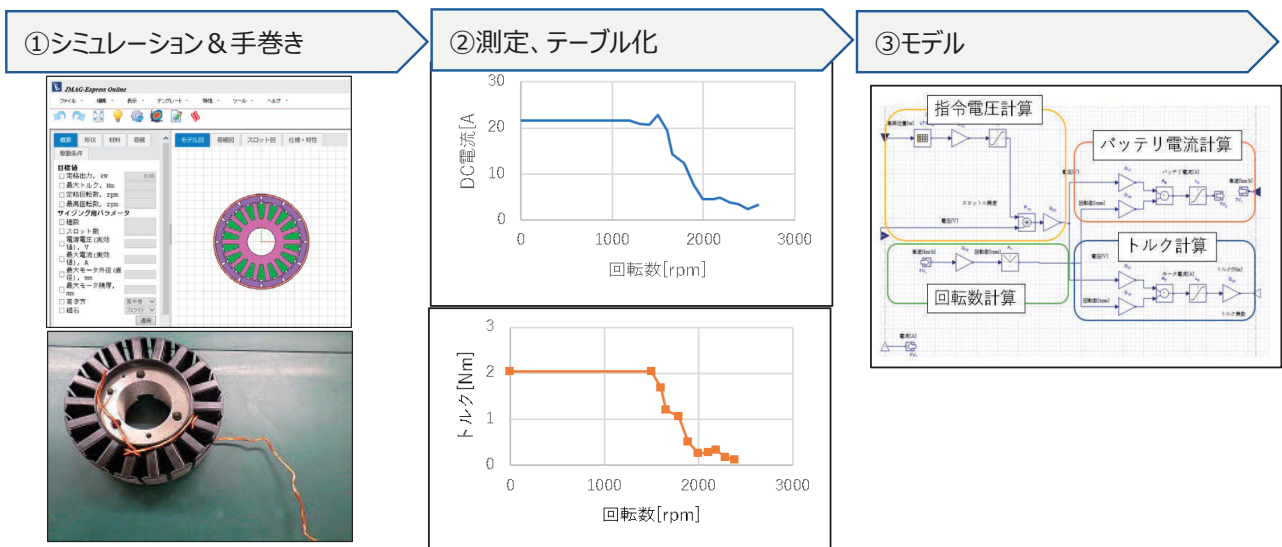


図5 モータモデル化の流れ

4-2. バッテリモデル

バッテリーモデルは、モータで消費される電流を入力とし、バッテリー電圧を出力とした。図6にバッテリーモデル化の流れを示す。バッテリーモデルは、「SOC³⁾とOCV⁴⁾のテーブル」と「通電時の電圧降下」からモデル化した。なお、「SOCとOCVのテーブル」と「通電時の電圧降下」は、実測して作成した。

3) SOC(State Of Charge)は、充電率または充電状態を表す指標

4) OCV(Open Circuit Voltage)は、バッテリーの開放端子電圧

4-3. 車両モデル

車両モデルは、モータからの駆動力と走行抵抗を入力とし、車両速度と位置を出力とした。車両モデルは、ホイールベース、車両重量、車両重心、タイヤ半径、タイヤ慣性モーメントを実測し、モデルに反映した。

4-4. 抵抗モデル

車両の走行に伴い発生する主要な抵抗は、下記の2つが挙げられる。

げられる。

- ・ 走行抵抗(空気抵抗、転がり抵抗)
- ・ 勾配抵抗

これらのモデルについて下記に述べる。

(1) 走行抵抗モデル

走行抵抗モデルは、車両速度を入力とし、走行抵抗を出力とした。走行抵抗は、転がり抵抗と、空気抵抗により表現される。転がり抵抗は、タイヤの変形によるエネルギー損失であり、惰行法により測定した。空気抵抗は、空気と車体表面との摩擦による損失であり、空力解析により算出するこれらの結果をモデルに反映した。

ここで、縦列走行について述べる。縦列走行とは、空気抵抗は前走車よりも後走車のほうが小さくなるという効果を利用した走行方法である。図7に縦列走行時の空力解析結果を示す。このように前走車よりも後走車のほうが、空気抵抗が60%小さくなるのが確認できたので、パラメータとしてモデルに実装した。

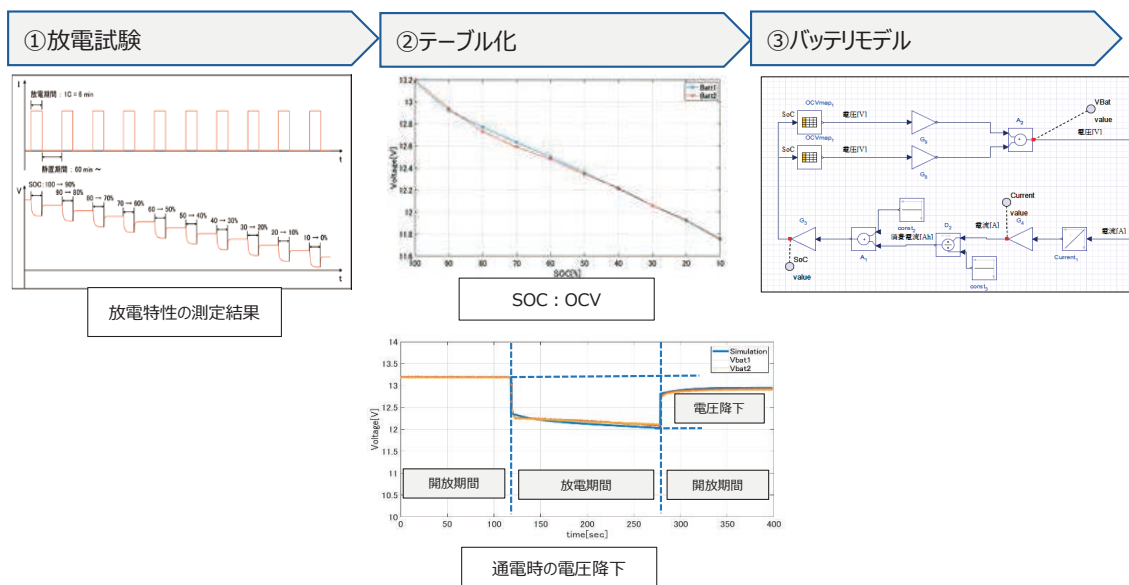


図6 バッテリモデル化の流れ

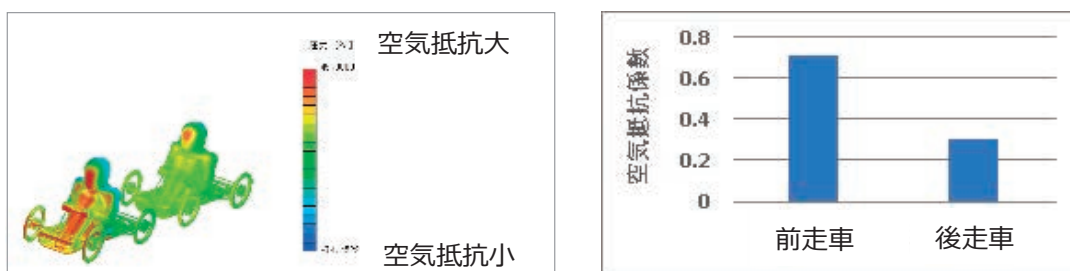


図7 空気抵抗結果

(2) 勾配抵抗モデル

勾配抵抗モデルは、車両位置を入力とし、勾配抵抗を出力とした。勾配抵抗は、坂道を走行する際に発生し、主として車両重量と勾配に比例する損失である。図8にモデル化の流れを示す。地形データに走行経路を描画し、走行位置毎の標高を算出し、この結果をモデルに反映した。

を結合したものであり、モータのパラメータ(巻き線の太さ、巻き数、巻き方)を変えることで、周回数をシミュレーションするものである。JMAGで選定した2つのモータパラメータ(回転数重視・トルク重視)を、レースシミュレーションしたところ、どちらも、図9の「30分走ったが、周回数が足りなかった仕様」や「途中で止まった仕様」のグラフのようにはならず、大差なく9周走り切れることがわかった。

そこで、モータの作りやすさより、表2に示す回転数重視となるパラメータとした。

4-5. レースシミュレーションモデル

レースシミュレーションモデルは、前述4-1～4-4の各モデル



図8 勾配抵抗モデル化の流れ

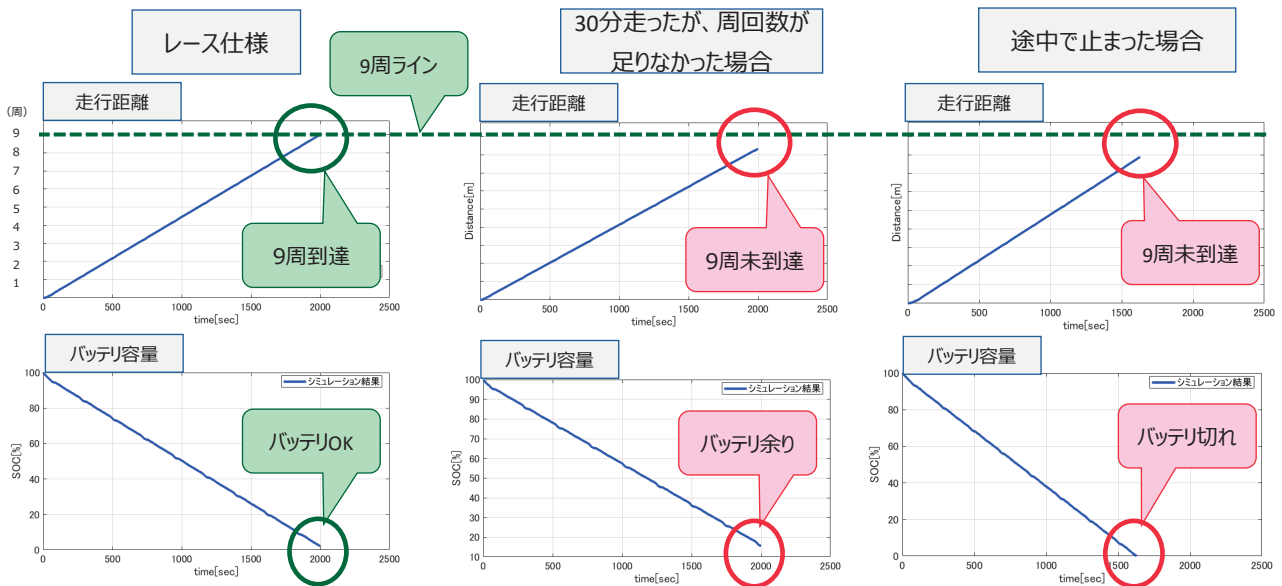


図9 統合シミュレーション結果

表2 選定したモータのパラメータ

巻き線の太さ	巻き数	巻き方
Φ 1.2mm	18ターン	3直2並列

5 レース結果

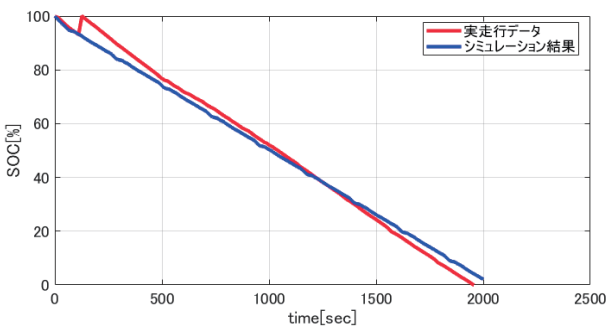
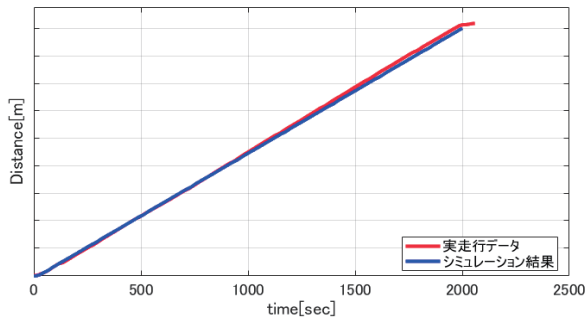
表3にレース結果を示す。レースシミュレーション通りの周回数9周を達成し、総合優勝を果たすことができた。

表3 レース結果

	チーム	周回数	1位との差
1位	ヤマハモーターエンジニアリング ①	9	—
2位	ヤマハモーターエンジニアリング ②	9	0分00秒037
3位	他チーム ①	9	2分03秒538
4位	他チーム ②	8	1LAP

※同一周回数の場合、先にゴールラインを通過したチームが先着となる

図10に実走行データとレースシミュレーション結果の比較を示す。このグラフからレース終了時の周回数、およびバッテリー放電率が、実走行データとシミュレーションが同等であることが分かる。これにより、シミュレーションの有効性が確認できた。



	周回数[周]	放電[%]
シミュレーション	9	98
レース結果	9	98.4

図10 実走行データとレースシミュレーション結果の比較

6 おわりに

EVミニカートレースに参戦し、各コンポーネントのセッティングおよびモデルを活用したレースシミュレーションにより総合優勝することができた。ワンメークレースで優勝できたことで、我々は、「同じコンポーネントを使用したとしてもより高いパフォーマンスを引き出せる技術を保有している」と示すことができた。今後は、各コンポーネントの損失を低減できる制御技術や、より実測に近いシミュレーションを行える技術の獲得を目指して、さらなる技術向上に努めていく。

参考文献

[1] 野口俊介, 鈴木憲史, 百目鬼英雄: “方形波ブラシレスDCモータの通電角による効率比較”, 日本 AEM 学会誌 Vol 23, No. 2, pp. 276-281, (2015).

著者



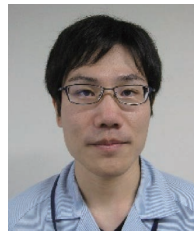
鷹野 雅一
Masakazu Takano
ヤマハモーター
エンジニアリング株式会社
モビリティシステム開発部



藤原 朝記
Asaki Fujiwara
ヤマハモーター
エンジニアリング株式会社
モビリティシステム開発部



友岡 祐弥
Yuya Tomooka
ヤマハモーター
エンジニアリング株式会社
モビリティシステム開発部



白澤 樹
Tatsuru Shirasawa
ヤマハモーター
エンジニアリング株式会社
モビリティシステム開発部



鈴木 聖也
Masaya Suzuki
ヤマハモーター
エンジニアリング株式会社
モビリティシステム開発部