

電動モトクロス CR ELECTRIC の開発

Development of Electric Motocrosser CR ELECTRIC

加藤 誠 司¹

Seiji KATO

木下 雅 之¹

Masayuki KINOSHITA

秋吉 洋 行¹

Hiroyuki AKIYOSHI

古山 拓 也¹

Takuya FURUYAMA

北岡 惇¹

Makoto KITAOKA

要 旨

モータースポーツなどの FUN 領域で電動車両の新たな価値創出の一助となる、電動モトクロス CR ELECTRIC を開発した。バッテリーセルの選定と制御でのローンチコントロールとエネルギーマネジメントの仕様を構築したことで、モトクロスで求められる動力性能と航続距離を得ることができた。L 字型バッテリーパックの構築と、フレームボデーの剛性値を最適化し、CRF450R 同等の完成車諸元を達成した。さらに 400 V 帯の高電圧パックの構築と冷却系部品を電動モトクロスに合わせて再構築したことで、各部品の小型化と軽量化につながった。これにより、走行時の軽快感、走破性、旋回性といった操縦安定性を得ることができた。

ABSTRACT

In an attempt to offer a new value of EV in the FUN category such as the motorsports, the electric motocrosser CR ELECTRIC has been developed. The employment of launch control and energy management systems upon the selection and control of battery cells enabled realization of the dynamic performance and the range required for the motocross machine. Developing the L-shape battery pack and optimizing the frame body stiffness, the specification of complete vehicle similar to the CRF450R are achieved. Moreover, the development of high-voltage pack as high as 400 volt along with the redesigning of the cooling system to adjust to the electric motocrosser resulted in the downsizing and weight reduction of various component parts. With these measures taken, the maneuverability and stability such as nimbleness, roadability, and turnability have been accomplished.

1. ま え が き

社会環境の変化により、四輪車のみならず二輪車においてもカーボンニュートラル化の実現が求められている。Honda は、2050 年までに全製品および企業活動におけるカーボンニュートラルの実現を目標としている。また、2040 年代には全ての二輪製品においてカーボンニュートラルを達成する方針であり、これを達成するための環境戦略の中核として、二輪車の電動化を積極的に推進している⁽¹⁾。

そしてモビリティのカーボンニュートラル実現は、モータースポーツにおいても例外ではない。既に Formula 1 や MotoGP においてカーボンニュートラル燃料の導入^{(2),(3)}が始まっている。電動化においては、Formula E や MotoE といった電動車専用レースも行われている。しかし、現在主流であるリチウムイオン電池のエネルギー密度はガソリンに対して約 2% 程度であり、高出力域を多用するレース

においては航続距離が課題となっている。一方で、電動車は近年のモータ制御技術の進化により出力制御が容易であり、コントロールしやすいドライバビリティを持っている。また、ガソリン車に比べて静粛性が高く排ガスの出ないクリーンな車両であるため、都市部や室内アリーナでもレースが可能であることも魅力の一つである。

Honda では商用や日常の移動手段といった近距離型の小型コミューターバイクとしてこれまで電動二輪車を商品化してきた。これに加え、FUN 領域の新たな価値創出として、欧州や北米で人気が高くスタジアムなどでも行われるモトクロスに焦点を当て、電動モトクロッサーの開発を行った。

技術検証として、2023 年全日本モトクロス選手権 第 8 戦川越ラウンドに参戦した。そこでヒート 1 でクラス 2 位、また 3 ヒート中 2 回のホールショット獲得という好成績を残すことができた。このことは Honda 初の電動二輪車でのレース参戦としてメディアの注目度も高く、電動車

¹ 本田技研工業株式会社

E-mail: seiji_01_kato@jp.honda

両の認知につながる結果となった。

本稿ではFig. 1に示す電動モトクロスカー CR ELECTRICの基幹部品であるバッテリーをはじめとした電動ユニットで採用した技術と、それらを搭載する車体技術について紹介する。



Fig. 1 External view of CR ELECTRIC

2. 開発のねらい

2.1. モトクロスの特徴

モトクロスとは、未舗装で短距離の周回コースにてスピードを競う二輪車のスプリントレースである。屋外の平地や丘陵地、またはスタジアムといった様々な場所をフィールドとして利用し、起伏のある地形を人の手で造成しコースを形成する。Fig. 2に示すとおり⁽⁴⁾、巨大ジャンピングスポットも設けられており、跳ねたり飛んだりといった三次元的なアクションが多い。さらには天候やレースの進行とともに路面コンディションが変化するため、様々な要素に対応する車両が求められる。

レース構成として走行時間15から30分程度のヒートレースを、1日の中で2から3ヒート行う。各ヒートの順位を元に1レースの総合順位を競う。30台から40台のバイクが横一列に並び、スターティングゲートを使用して一斉に全車が走り出す、迫力あるスタートシーンも魅力の一つである。

このような条件で行われるモトクロスではコンパクトな車体と軽さが重視される。出力がいかに優れていても大柄で重いモトクロスカーでは走りにくい。また、滑りやすいオフロード路面を走行するので、最大出力も必要であるがリニアなトルク特性と扱いやすいトラクション性能も重要である⁽⁵⁾。

また、多人数でスタートするレース構成上、ホールショット（レーススタート直後の第1コーナーにトップで進入すること）を奪取することは、レース展開を有利にするために重要な要素の一つになることも特徴である。

2.2. 電動車の特徴

2.2.1. 搭載エネルギー

ガソリン車はガソリンの燃焼によって発生した熱エネルギーを機械エネルギーに変換し、駆動力を生み出す。これに対し、電動車はバッテリーの電気エネルギーをモーターで機械エネルギーに変換し、駆動力を得ている。現在のバッテリー技術では単位重量当たりのエネルギー密度はガソリンに対し2%程度である。モーターの高い駆動変換効率を加味しても同車格のガソリン車で得られる利用可能なエネルギーの約40%程度にしかない。これらは、航続距離の少なさや車両重量の重さに影響を与える。

また、ガソリンは燃焼の際に多くのエネルギーを排熱として失うことに対し、電動車は電力の変換効率が高く、ガソリンエンジンほどの排熱は発生しない。一方で、バッテリーは温度による特性変化も大きく、少ない搭載エネルギーをより効率よく使うためには運転条件や使用環境に合わせた熱マネジメントも重要である。

2.2.2. 出力特性

Fig. 3に電動車とガソリン車の駆動力線図を示す。電動車はバッテリーとモーターの特性により低回転時に高トルクを



Fig. 2 Motocross riders jumping on track

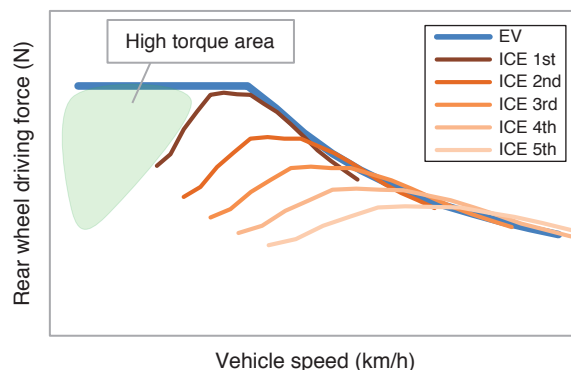


Fig. 3 Comparison of driving force between EV and ICEV

発揮できる。また、電気により発生させるトルクや出力は制御プログラムにより容易に変更が可能である。これはガソリンエンジンがある程度の回転数にならないと十分なトルクが得られないことと異なる。

また、Fig. 4 に電動車とガソリン車の出力特性の違いを示す。高出力を維持するために、ガソリン車は車速に対して適切なギアを使う必要があることに対し、電動車は変速ギアを持たずとも高回転までフラットな出力特性を得ることができる。すなわち、スロットル操作だけで最高速まで容易に到達することが可能となる。よって、速度に合わせたギア選択が不要となり、簡便な操作だけで車両コントロールがしやすいドライバビリティを持っていることが特徴である。

2.3. 開発目標

前章で述べた電動車の出力特性は、絶えずコース環境が変化するモトクロス競技において、有意性があると考えられる。これを利用するためには、現在レースとして確立しているガソリン車両に匹敵する出力と航続距離を満たす必要がある。そこで、CRF450R 同等の動力性能を持ち、実際に行われている 1 ヒート 15 分のレースを走り切る事を目標と定めた。また、旋回性能や悪路の走破性もレースを走る上で重要な要因であり、これには、完成車の重心位置やフレーム剛性といった要素が影響する。搭載物の異なる電動車両においても、Table 1 に示す CRF450R の完成車諸元と同等となる仕様の構築を目標とした。

2.4. モトクロスにおける電動車両の課題

Fig. 5 に示す通り、モトクロスーに求められる完成車諸元で比較すると搭載できるエネルギーの差が生じるため、単純に搭載エネルギー量を合わせるだけでは車体サイズが大きく、かつ、重くなる。搭載エネルギーが少ないまま高出力を使い続けてしまうと目標としている航続距離には到達しない。よって、電動車両の特性を生かし、高い出力を維持しながらも航続距離を延ばす手法が必要となる。

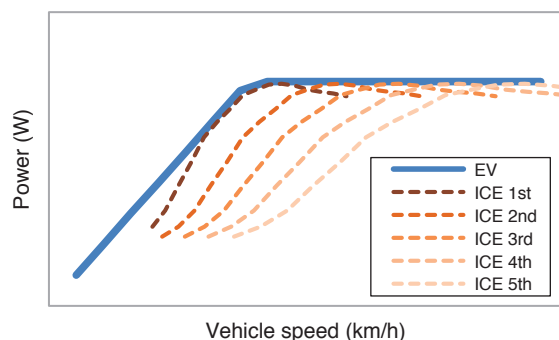


Fig. 4 Comparison of power characteristics between EV and ICEV

Table 1 Specifications of 2021 model CRF450R

Overall length [mm]	2182
Overall width [mm]	827
Overall height [mm]	1267
Ground clearance [mm]	336
Seat height [mm]	965
Caster angle [deg]	27.7
Trail [mm]	114
Wheelbase [mm]	1481
Front brake	Single 260 mm disk
Rear brake	Single 240 mm disk
Front suspension	49 mm fork
Rear suspension	Pro Link
Front tire	80/100-21 51 M
Rear tire	120/80-19 63 M

また、使用エネルギーが異なることから搭載物の構成も異なる。単純に従来の部品の共用化を行うことは容易ではないため、フレームなど主要部品の形状を変更しなければならないことも課題となる。

また、電動部品による発熱の課題も存在する。電動車両はモータを駆動させるための電力供給をする際に発生する電力損失が熱エネルギーに変換されていることで発熱する。モータ、バッテリー、インバータは電動車における主要部品であり、電力供給により発熱を伴う。これらの部品は耐熱温度を超えると破損につながることから、設定温度以下に保つための出力制限機能が設けられている。出力制限により加速度やトルクが低下することはモトクロスにおいて不利になることから、電動部品の熱マネジメントが求められる。

これら電動モトクロスーの課題について、本テーマで採用した要素技術を次章より紹介する。

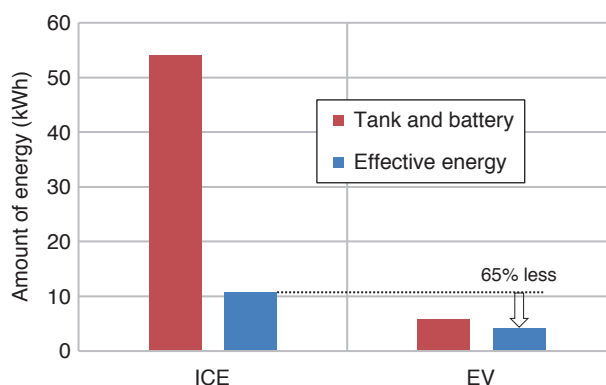


Fig. 5 Comparison of installed energy in motocrossers of EV and ICE

3. 電動車両要素技術

3.1. バッテリー

電動車の完成車性能と諸元を決めるためにバッテリーは重要な部品である。完成車が必要とする出力と航続距離を実現する上で最小、最軽量となるようなバッテリーパック（以下パック）構造とそのシステムについて述べる。

3.1.1. バッテリーパック構造

パックは多数のバッテリーセル（以下セル）で構成され、パック性能はセルの性能に依存する。セル性能は重量エネルギー密度と重量出力密度によって評価され、いずれの密度も高い水準であることが実用上重要である。Fig. 6 に、セルメーカー各社の代表的なセルを抽出し、重量エネルギー密度と重量出力密度をプロットしたグラフを示す。

電動モトクロッサーに要求されるセル性能は、CRF450R 同等性能を得ることができる重量出力密度と、レースを走り切ることができる重量エネルギー密度で切り分けることができる。ここで切り分けたエリアの中から、車両コンセプトやパック形状を考慮しセルを選定する。本開発では、1 ヒート走り切ることを主とし、要求エリア内の中でもより高出力のセルを選定した。

次に一般的なセル形状を Fig. 7 に示す。パウチ型や角型セルは、その直方体形状と一辺に集約される電極の配置が特徴である。そのため、効率よい配置とするためには、セル形状に合わせた直方体形状にすることが求められる。一

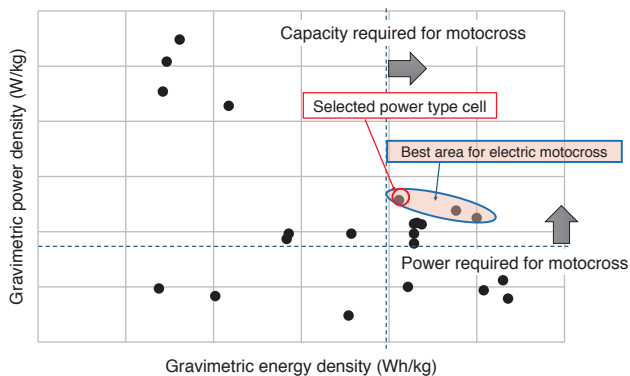


Fig. 6 Comparison of gravimetric energy density and gravimetric power density of various battery cell types

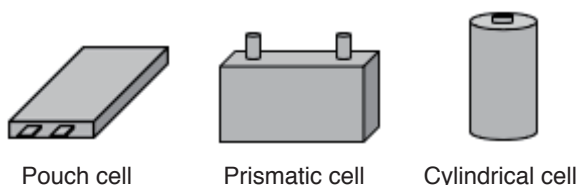


Fig. 7 General cell shapes

方で円筒型のセルは負極配置の自由度とその外形から、パック外形が複雑になっても余分なスペースが生まれにくい。本テーマでは、前述の性能を満たした選定エリアの中から円筒型セルを選択し、Fig. 8 に示すような L 字配置のパックを構築した。これにより、Fig. 9 に示すようにパック内における重量物であるセルを完成車の後方領域と下方領域まで配置することができた。この L 字配置のパックを構築できたことで、Fig. 9 図中に示すように、電動モトクロッサーの重心位置は、目標としていた CRF450R 同等を達成することができた。

3.1.2. バッテリーシステム

一般的な電動スクーターのパックでは航続距離とバッテリー寿命の長さが重要である。そのためセルの直列接続数を最小限にして並列接続数をより多くすることで上述の航続距離と寿命を最大化する手法が主流である。この手法を採用した結果、バッテリーパックの出力電圧は 50 から 100 V 帯となることが多い。

電動モトクロッサーには、レースで優位性を持たせるために高い出力で走行することに加えて、レースを走り切れるだけのバッテリー容量を搭載することが求められる。これらを実現するために、前章で選定した高い出力が得られるセルを用い、パックとしての高出力を実現するために直列数を最大化した。そのため、パック出力電圧は Honda 二輪初となる 400 V 帯の高電圧パックを開発した。さらに、レースを走り切れるだけの最小並列接続数を設定した。

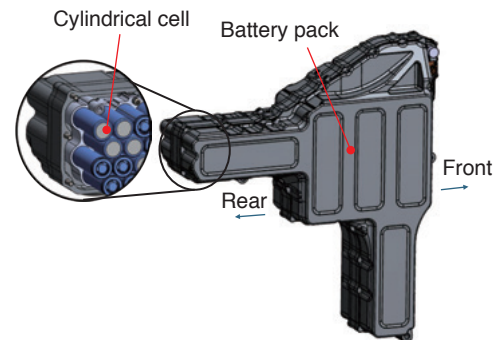


Fig. 8 Battery pack appearance and cells

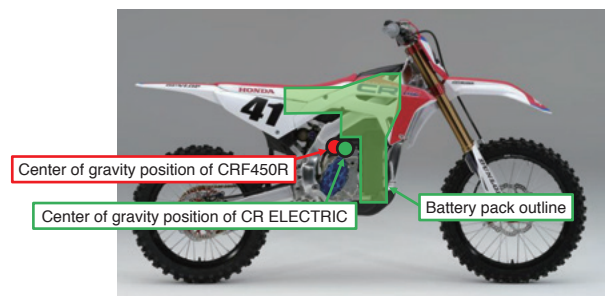


Fig. 9 Battery pack outline and vehicle CG position

パック電圧を 400 V 帯に高電圧化したことで、パック出力電流値が抑えられ、高電圧帯の配線上に存在する主要部品の発熱を抑制することができた。これにより、モータ、インバータの小型化と軽量化ができ、結果として CRF450R の車両重量に対して、電動モトクロスーの車両重量増加は 10% 以内に抑えることができた。

3.2. 制御

完成車制御システムは、モーター一体型インバータとバッテリーパックに内蔵されたバッテリーマネジメントユニット、駆動力算出を行う車両マネジメントユニットの三つを組み合わせる制御システムを構築した。

以下に電動車の特性を活かしレースを優位に進めるために作成した制御機能を紹介する。

3.2.1. ローンチコントロール制御

モトクロスの特徴であるホールショットを得るためにはスタートから 1 コーナー進入まで高い駆動力と出力を維持することが求められる。だが、スタートに特化した動力性能のままでレースに臨めば、車両の扱いにくさにつながり、レースを有利に進められない。そこで、レーススタート時の最初の加速時のみ有効になる走行モード切替機能（以下ローンチコントロール）を追加した。

ローンチコントロールは停車中での操作で有効になり、スタート前にライダーによってセットされる。発進後にスロットルを閉じることで自動的に無効となる。無効化されたのちは、有効化前に選択していた任意の走行モードでの走行となる。

レーススタートにおいては、可能な限り高出力でかつホイールスピンさせずに後輪を駆動させることが求められる。また、発進時加速のフロントタイヤの浮き上がり（ウィリー挙動）を抑えつつ安定した加速を与えるため、出力特性を変更した。Fig. 10 に各モードでの出力特性を示す。

スタート時に単に最大駆動力を与えるのではなく、低回転領域の駆動力を約 20% 下げた特性とした。さらに、到達速度はより高い速度とするために最大出力を約 25% 高く

設定した。この値はコースやコンディションによって任意の値で設定できる。これにより、ライダーやレース毎で最適な特性を選択することができ、レースでの優位性につながった。

3.2.2. エネルギーマネジメント

限られた搭載エネルギー量を効率的に消費するためには、レースにおける電力消費量の調整が必須である。それを補助するための制御アプリケーションとしてエネルギーマネジメント機能を追加した。

Fig. 11 に示す通り、電費調整手法は以下の設定とした。

- (1) レーススタート時に電動モトクロスーの優位性を得るため、ローンチコントロールモードは電力消費を考慮せずモータ出力を最優先とする。
- (2) ローンチコントロール解除後のレースにおいては想定走行時間で電力を使い切れるような出力となるレース用の出力特性にて走行を行う。
- (3) レース中の予測が容易ではない電費変動に対し、コース周回ごとの消費電力に対する余裕度と不足度を計算する。

この結果から、出力特性を調整する機能（補助アプリケーション）による補正を行う。

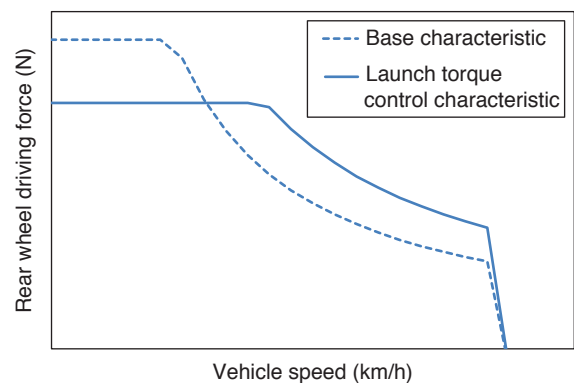


Fig. 10 Launch torque control characteristics under different operating conditions

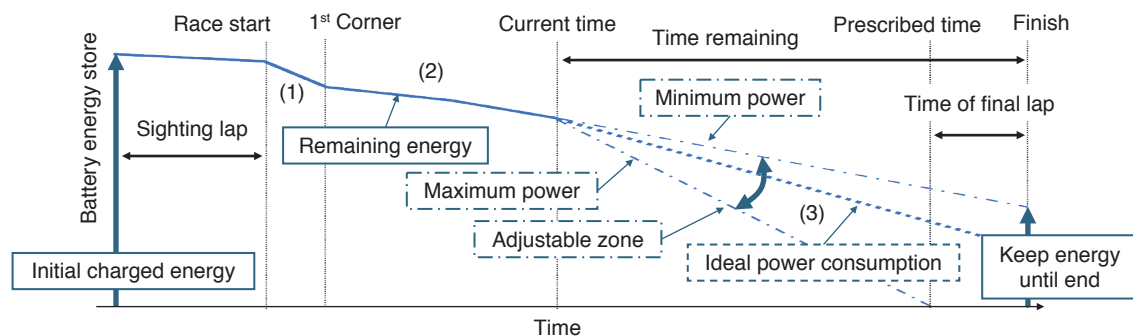


Fig. 11 Concept of battery energy management control during race

これを実現するため、異なる出力制御モードを作成し、設定した各出力において電費計測を実施した。Fig. 12に出力制御モードと消費電力の関係性をプロットしたデータを示す。このデータをもとに想定走行時間で電力を効率よく使い切れるような出力となるレース用の走行モードを作成した。

また、補助アプリケーションとして、残電力量とローンチコントロール終了からレースの残時間より、ラップごとの消費可能電力を推定した。そして、事前測定した出力と消費電力の線型補完からモータトルクの制御アルゴリズムをリアルタイムで調整する機能を追加した。

3.3. 冷却系部品

モトクロスで他車よりも上位で走り切るためには、温度上昇による出力制限に至ることなく1ヒートさらには1レースを走り切る必要がある。そのため、各部品温度をコントロールする必要がある。本車両ではモータとインバータについて冷却を行った。冷却目標として、以下2つを定めて部品仕様を決定した。一つは1ヒート中に出力制限に入ることなく走行可能であること。もう一つは1ヒート終了後、次ヒートまで部品冷却し1レースを通して走行可能であることとした。本章ではこれらを満たすための冷却系部品について紹介する。

3.3.1. 放熱量設定

電動モトクロスにおけるレース走行条件でのモータとインバータの発熱量を設定するため、面積の異なるラジエータコアを用いテスト走行を行った。これより、高電圧部品の温度データを測定し、ラジエータ放熱量とレース中の各部品温度の関係を計測した。

Fig. 13に仕様の異なる各ラジエータで走行した際のインバータの温度データを示す。Fig. 14に仕様の異なる各ラジエータで走行した際のモータの温度データを示す。テスト結果から、今回搭載するモータとインバータの電力損失データを比較し、1ヒート走行後の各部温度を決定する発熱量を予測した。また、ラジエータコア面積違いによる水

温の差から、モトクロスレースの走行条件によるラジエータコア面積当たりの冷却能力を予測した。

その結果、ラジエータのコア面積はガソリン車と比較し64%低減し、重量は77%の軽量化となった。Fig. 15に軽量化したラジエータの外観図を示す。これにより、電動モトクロスとして1レースに必要な冷却性能の最適化を行うことができた。

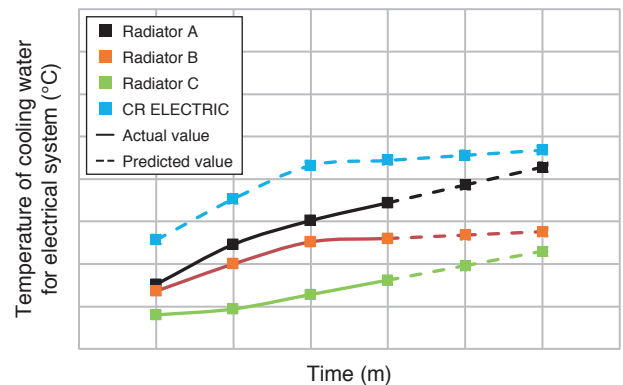


Fig. 13 Heat generation of inverter under varying operating conditions

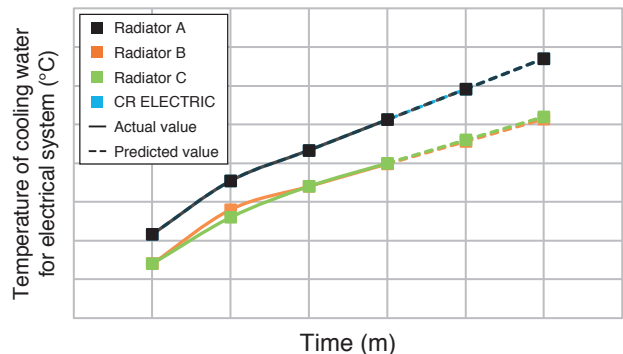


Fig. 14 Heat generation of motor under varying operating conditions

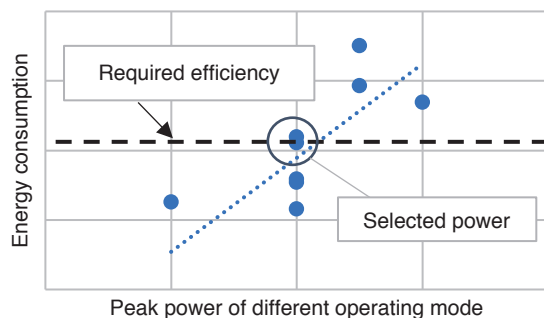


Fig. 12 Relationship between peak power of different control modes and energy consumption

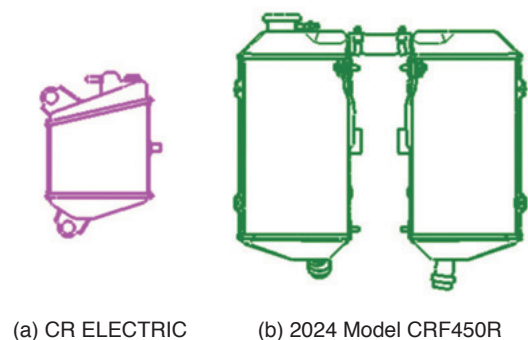


Fig. 15 Radiator size

3.3.2. ウォーターポンプ選定

多くのガソリン車はエンジンの回転運動からウォーターポンプの動力を得るメカニカルポンプが使われている。同様に、電動車でメカニカルポンプを採用した場合、ポンプ作動条件はモータの動作に依存する。これにより、アイドリングが不要な電動車両では、停車中に冷却水の循環ができなくなる。また、メカニカルポンプの場合、回転軸上に部品を配置またはギアを組み合わせて駆動を得る必要がある。そのため、筐体が車体幅方向に広がり、車体サイズ拡大につながる。

そこで電動ウォーターポンプを選択することで、パワーユニットサイズが小さくなり、停車中の冷却水の循環が可能となった。これにより、電動モトクロスカーの冷却目標を達成するための冷却システムの仕様構築ができた。

3.4. 完成車

3.4.1. 完成車諸元

自由自在な運動性能を確保するために CRF450R の諸元を目標とした。走破性を阻害しない最低地上高、トラクションを生かせる前後重量配分などを条件とし、Fig. 16 に示すように電動駆動ユニット全体の配置を決定した。

これに合わせて、完成車諸元は Fig. 17 に示すように、CRF450R と同じキャスター角、トレール量、シート高、最低地上高とし、ホイールベースは同等とした。これにより、電動モトクロスカーに要求される取り回し性能を実現した。

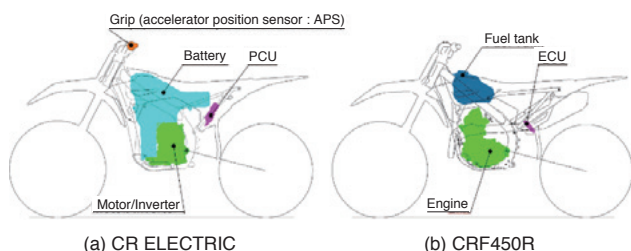


Fig. 16 Vehicle layout

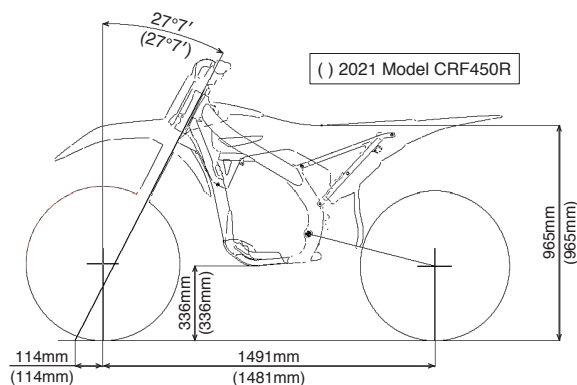


Fig. 17 Vehicle geometry of CR ELECTRIC

3.4.2. フレームボデー

電動モトクロスカーには、求められるバッテリー出力と容量を達成するために、限られたスペースに隙間が少なくなるようバッテリーを効率よく搭載することが重要である。従来の CRF450R のエンジンサイズに適したフレームボデーを流用するだけでは 1 レースに必要な搭載量を得ることは容易ではない。一方、フレームボデーの剛性は軽快感や走破性、旋回性といった操縦安定性に影響する。特にモトクロスは不整地で荒れた路面やジャンプ等も伴いながら走行するため、剛性バランスが重要となる。つまり、これまでガソリン車両で培ってきた経験をもとにした剛性バランスが求められる。

そこで、メインパイプは CRF450R で採用しているアルミニウム製セミダブルクレードルツインチューブフレームをベースとした。バッテリーの着脱性とフレーム剛性で求められる性能を得るため、メインパイプの断面形状を変更し、ヘッドパイプ部への繋ぎ方を直線的なレイアウトとした。その形状を Fig. 18, 19 に示す。これにより、フレーム剛性値の変化量を CRF450R に対して 10% 以内に抑えることができ、従来ガソリン車と同等の操縦安定性を確保した。

また、Fig. 20 に示すように大容量バッテリーの幅が収まるように、ヘッドパイプ後方直後から、メインパイプの幅方向を広げる形状とした。また、Fig. 21 に示すように、メインパイプ上部の曲げを鉛直に沿う方向にした。これにより、Fig. 22 に示すように、バッテリーの車体上下方向へのスムーズな脱着が可能となった。

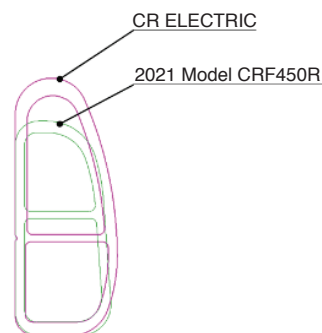


Fig. 18 Cross-sectional shape of main pipe

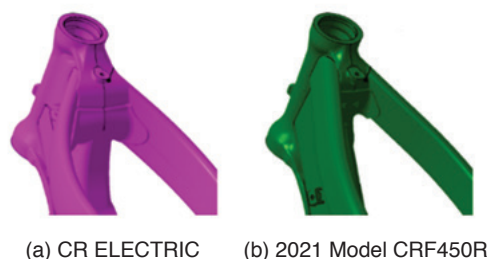


Fig. 19 Shape of connecting part of main pipe to head pipe

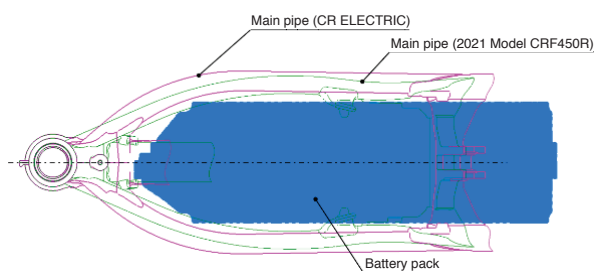


Fig. 20 Route of main pipe

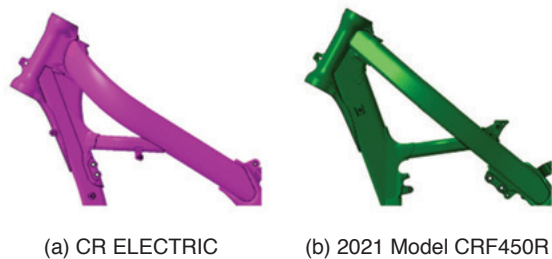


Fig. 21 Bending shape of main pipe

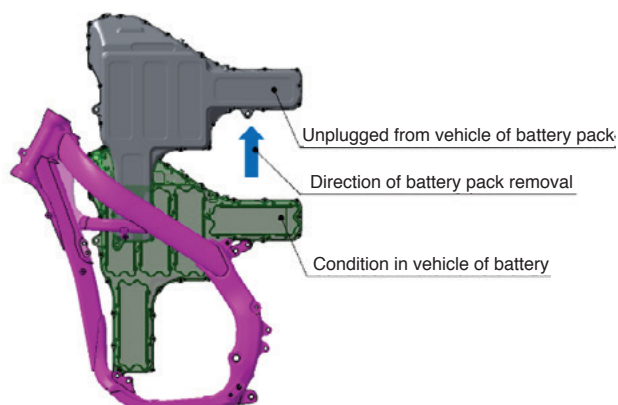


Fig. 22 Direction of battery pack removal

4. まとめ

電動モトクロスカー CR ELECTRIC を開発し、以下の成果を得た。

- (1) バッテリーに円筒形のセルを採用し、L 字型のバッテリーパックを構築したことで、目標とする出力を得ながら、完成車重心位置は CRF450R 同等とすることができた。
- (2) バッテリー電圧は Honda 二輪初の 400V 帯としたことで、主要部品の発熱が抑えられ、軽量コンパクトなパック構成を達成することができた。これにより、CRF450R の車体重量に対し、増加量 10% 以内に収めることができた。
- (3) 走行モード切替制御を開発し、電動モトクロスカーとしてホールショットに求められる動力性能と、レース

完走に必要なエネルギーマネジメントを可能とした。

- (4) EV コンポーネントにおいて、モトクロス用途での発熱量を予測し最適化することで、CRF450R と比較して 77% 軽量化し 64% コア面積を減らすことで軽量、かつコンパクトな冷却部品構成を達成できた。
- (5) 従来のモトクロスカーと大きく構成が異なる搭載部品でありながらも、CRF450R 同等の完成車諸元を達成し、モトクロス走行で求められる取回し性能を得ることができた。

より多くのレースに対応するためには、さらなる航続距離の拡大やレース中のバッテリー充電や交換手法の進化が期待される。カーボンニュートラル時代のモータースポーツを目指した CR ELECTRIC を具現化したことで、都市部や室内アリーナでもレース開催可能となり、今までにないユーザーへのアピールも可能となるだろう。

参考文献

- (1) <https://global.honda/jp/news/2022/c220913a.html> (参照 2024/12/24)
- (2) https://global.honda/jp/tech/motorsports/Formula-1/Powertrain_e-fuel/ (参照 2024/10/17)
- (3) <https://www.motogp.com/ja/racing-together/fuel-future> (参照 2024/10/17)
- (4) <https://honda.racing/ja/jmx/post/jmx-2023-rd08-ia1-race> (参照 2025/4/15)
- (5) 星紀夫, 志村康雄, 大熊孝則, 野村明史, 後郷和彦: 4 ストロークモトクロスカー CRF450R の紹介, Honda R&D Technical Review, Vol. 14, No. 1, p. 21-30

■ 著 者 ■



加藤 誠 司



秋吉 洋 行



北 岡 惇



木下 雅 之



古山 拓 也