

特集：モデルベース開発

20

電動系仕様の最適化計算システムの構築

Design System Construction for the Optimization of Electric System Specifications

米盛 敬*1
Kei Yonemori板坂 直樹*2
Naoki Itasaka栃岡 孝宏*3
Takahiro Tochioka

要約

マツダでは、全てのお客様に、「走る喜び」と「優れた環境・安全性能」をお届けするために、電気デバイスの段階的な適用を戦略として掲げている。自動車の機能向上を叶える構想設計は、一般に複数案が考案されるが、相互作用の複雑なシステムでは従属検討が膨大化するため、全ての影響を高精度に事前検討することは極めて困難である。

そこで、さまざまなハードウェアや制御ストラテジの組み合わせにおける期待性能をあらかじめ大量に試算しておき、要求に対して最適な仕様の組み合わせを瞬時に提示するデータベースの構築に取り組んでいる。今回、一定電圧と温度の条件下で IPM (Interior Permanent Magnet) モータを効率最大となる通電条件で運転した場合の動力特性計算の高速実行に成功した。これを循環型の自動計算システムに組み込むことで、人的には不可能なレベルの量的検討や、複数性能指標の同時検証が可能となったので、概要を紹介する。

Summary

To deliver "driving pleasure" and "excellent environment and safety performance" to all customers, Mazda set a strategy of the step-by-step application of electric devices. For functional improvement of vehicles, multiple numbers of conceptual designs are proposed in general, but as systems with complicated interactions require a huge number of subsidiary studies, preliminary studies of all the effects with high precision are very difficult.

Accordingly, we are establishing the data base which preliminary calculates a huge amount of expected performances generated by various combinations of hardware with control strategies and instantly presents the optimal spec-combination for a requirement. This time, high-speed implementation of dynamic-characteristic computation in vehicle driving was succeeded under the electricity conditions maximizing the efficiency of Interior Permanent Magnet (IPM) motor at a constant voltage and temperature. By incorporating the computation in the cycloid type automatic computation, quantitative studies beyond human capability became possible as well as simultaneous verifications of multiple performance indexes. The outline of the study is reported as follows.

1. 背景

自動車は、20世紀初頭に大量生産の技術革新を遂げて以来、既に100年間を経ているが、今もなお、更なる性能進化と技術革新が追求されている。近年の代表的事例としては、動力系に新たにモータ/インバータを組み込むことで加速フィーリングや燃費性能を向上させるハイブリッド車があ

る。旧来、エンジンやブレーキは各々専用のペダルで操作されていたが、モータは双方のペダル指令に対して適切な制駆動力を発揮せねばならない。またエンジンをエネルギー消費抑制のために走行中に休止させ、駆動力の急峻な垂下が生じた際、瞬時に起動して動力を補いつつ、車両運動エネルギーの回収機能も実現せねばならない。これら制駆

*1~3 技術研究所
Technical Research Center

動力の統合的な運用技術を一端として、より高度な技術への革新が要求されている。

そこでマツダでは、パラメータ最適化技術を車載部品特性のモデリング技術に組み合わせ、製品開発へ適用する試みを行っている。例えば、遺伝的アルゴリズムとエンジン性能モデルとの組み合わせにより、非線形特性領域でのエンジンの諸元設計が行われている。⁽¹⁾あるいは多目的最適化手法と構造強度モデルの組み合わせにより、車両の複数方向の壁面衝突における運動エネルギー吸収性能の設計が行われている。⁽²⁾

これらのモデルをベースとした開発手法は、CX-5 など SKYACTIV TECHNOLOGY を適用した商品のコンセプト設計⁽³⁾に用いられ、実機測定結果とモデルの整合取りも施されたことで、有効性が向上しつつある。本稿では、電動車両の構想設計におけるモータ/インバータ仕様設計のモデルベース開発に取り組むために、新たに構築した動力特性計算手法と、その有効性の検証結果について紹介する。

2. 電動系領域のMBD 需要

車両駆動用原動機としてモータ/インバータを用いる場合、下記の電気系固有の特長を活かす検討がなされる。

- (1) 全速度域で正負の大トルクを高応答で発揮する。
- (2) 車両の運動エネルギーを回収する。
- (3) 運用において排出ガスや騒音を生じない。

これらの効果を最大化するには、電気駆動システムの仕様設計が重要になる。例えば、自動車は独立移動体で、走行中のエネルギー供給が現在は不可能であるため、運用中に蓄電デバイスの過充電や過放電が生じないように、電気エネルギー収支を計画的に管理する必要がある。また、その動力特性は、電源電圧や、モータ/インバータそのものの動作温度とも強い相関があるため、過熱時は機器保護のために出力制限を講じる必要がある。

上記の事例を含め、電動系への要求機能は多岐にわたり、最大性能の向上のみならず、発熱時の性能安定性などを一元的に実現することが求められる。しかしながらIPMモータの電磁界断面設計パラメータ群の間には、複雑な交互作用があり、所望の動力特性を発揮する究極のモータ設計を獲得することは容易ではない。また一つのモータに対して、効率最大となる交流運転条件は一对一で決まるはずであるが、制御パラメータ間にも交互作用があるために、その解を試行錯誤なく得ることは難しい。

一方、系統電源のように電圧が安定し、また設置環境温度や運用温度が一定であれば、電気系は略線形の挙動を示すことがよく知られている。自動車以外の用途のモータ/インバータ製品においては、モータ制御の自動チューニン

グは既にスタンダードな技術になっている。

そこで今回、マツダでは必要な試行錯誤をスキップするのではなく、極めて高速に実行すること、更には目的志向で設計を洗練することをねらいとし、モータの電磁界解析モデルと最適化アルゴリズムを高速計算サーバ上で組み合わせることに取り組んだ。モータの制御ストラテジはさまざまあるが、基礎検討として最も低発熱となる効率最大運転条件を自動探索する手法の構築を行った。またモータトルクや電流や電圧などのリアルタイム挙動特性を構想設計段階で掌握することに取り組んだ。

これによりハイブリッド自動車や電気自動車のように電源電圧や動作温度が不安定に変動する製品でも、挙動をあらかじめ網羅的に検討し、常に最適な駆動条件で運転を行うことができれば、モータ/インバータの動作効率が向上し、燃費や電費性能の向上になる。更にモータによる制駆動力の高応答操作により「優れた環境安全性能」をお届けすることにつながると考える。

3. 設計の最適化計算システムの概要

今回構築した計算システム機能の全体像をFig. 1 に示す。数十個の入力変数（設計パラメータ）や出力変数（動力性能値）間の寄与度や交互作用を解析するため、変数間の関係の分析機能を持つIDAJ社の modeFRONTIERをプラットフォームに用いた。

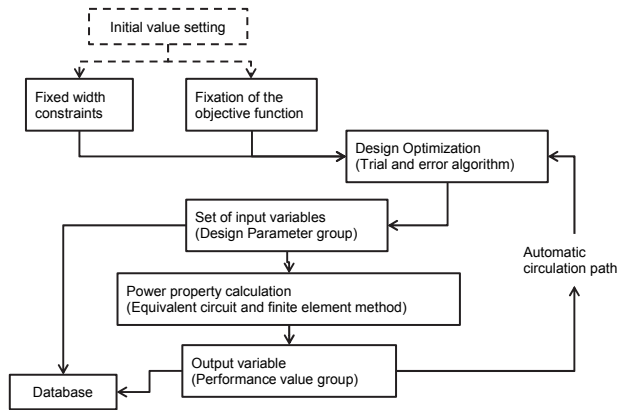


Fig. 1 modeFRONTIER Work Flow Example

本計算システムの機能検証のために、準備したハードウェアの主要スペックを以下に記す (Table 1)。

Table 1 Calculation System Specifications

| | |
|---------------------|--|
| PRI/POST PC | Windows, 64Bit, Intel Xeon 1 CPU Dual Core, 8GB RAM/Core, 3GHz |
| Calculations server | Linux, Intel Xeon 32 CPU Quad core, 4GB RAM/Core, 2.93GHz |
| Storage | Temporary area: 500GB, Database area: 4TB |

3.1 各計算機能の概要

(1) 計算全体の進捗管理, およびデザインの最適化

modeFRONTIERは、数値間の関係の分析に加え、全計算の進捗状況管理とデザインの最適化を行う。modeFRONTIERは、一連の計算を実行した後、入力変数と対になる出力変数をデータベースへ記録し、1サイクルの完了を判断する。その後、次のサイクルの計算を行うために出力変数と目的関数とを照合し、より性能向上が期待できる方向へと入力変数の組み合わせを自動刷新して、再計算のサイクルに入る。よってFig. 1の通りフローは、永久循環型となっている。

デザインの試行錯誤パターンは、アルゴリズムとしてあらかじめ備わっているが、それぞれの手法には固有の進化パターンの偏向があり、性能向上を実現させる上で障害になりうる。そこで遺伝的アルゴリズム・実験計画法・ゲーム理論などのアルゴリズムの複合的な組み込みを行った。

(2) モータの電磁界解析と形状変形

JSOL社のJMAG-Studioが、modeFRONTIERより設計パラメータ(入力変数)を受け取り、電磁界解析を行う。この段階では、数学的な正弦波電流源に対するトルク特性と損失特性を回転数や電流振幅や電流位相ごとに算出する。

デザイン刷新のたびに、設計者による断面形状の作図を要すると、設計者が従事できない場合に計算が停止する。そこでJMAG-Studioのモータプレート機能をベースに用い、modeFRONTIER が数値操作し、自動で作図するようにプログラムを改造した。例を Fig. 2 (a) に示す。

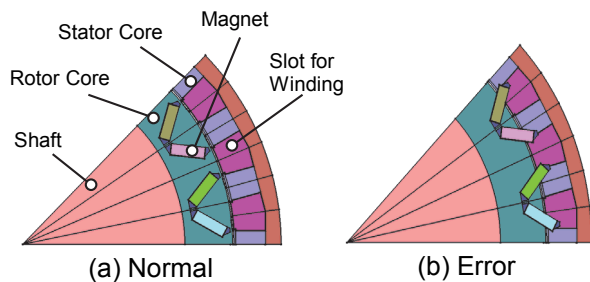


Fig. 2 Motor's 2D Electromagnetic Field Cross Section FEM Model Sample

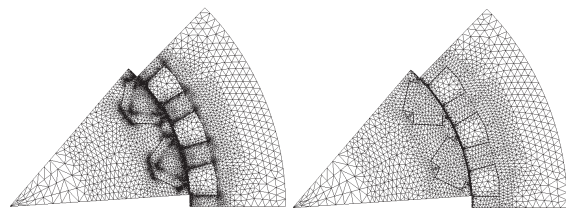
ここで、モータプレートはステータとロータの幾何学的な形状の整合性を考慮せず、単純に数値を操作するため、設計変数群の組み合わせが不適であると、例えばロータに埋設されているべき磁石がはみ出してステータに食い込み、回転不能な状態に陥る場合がある。例を Fig. 2 (b) に示す。またJMAG-Studioは、エラーデザインであることを認識できずに解析を実行するため、不要な解析業務が発生する上、無用の出力データの混在により設計改良の試行錯誤が乱れてしまう。

そこで自由な変形と形状エラーの潰し込みを両立するための拘束式を追加した。これにより当初、単純にコンピュータが自動生成したデザインの中で、設計者が見て実際に回転可能なデザインは7%程度しかなかったが、成功率を99%以上に向上した。

モータ電磁界解析において一般的には、解析精度とメッシュには相関があるため、解析後に隣接要素間の数値連続性を評価し、不連続性が著しい場合はメッシュ追加により再計算する自動メッシュ解析手法が主流である。さまざまな断面形状を試行錯誤する場合、本来は自動メッシュを用いることで高精度の解を期待できるが、解析成功に到るまで計算コストが数倍に増加する要因になる。

そこで予備検証段階でモータの自動メッシュ解析を多数行い、高調波成分の解析精度を確保するためにメッシュを細かく切るべき領域と、その粒度を見出した。この手法を適用したメッシュ生成を行うことで、メッシュの追加、修正を行うことなく、1回での計算実行を実現した。

Fig. 3 (a) にメッシュを追加手法での最終的なメッシュイメージを示す。Fig. 3 (b) には同じ断面設計に固定メッシュを用いた場合を示す。ノウハウを適用した(b)によりメッシュ数は少ないながらも、ほぼ同等の計算結果を得た。



(a) Adaptive meshing method (b) Fixed meshing method
Fig. 3 Comparison of Motor's FEM Mesh of Adaptive Method and Fixed Method

(3) 挙動モデルの作成

JMAG-Studioによる電磁界解析の解析結果が数百以上集積されると、JSOL社のJMAG-RTが、それらの点群情報を数枚のマップへ統合し、MathWorks社のMatlab/Simulink形式で挙動モデルを生成する。

JMAG-RTの挙動モデルの生成方法には、プリミティブな検討用の高速版から、比較的重い収束計算を要する拡張版までさまざまな手法があるが、IPMモータにおいて空間高調波による印可電圧やトルクの入出力の不整合を無視すると、トルクと損失の予測精度が低下するため、空間高調波型へ統一した。

モータの実機では、モータのスロット高調波やインバータのスイッチングにより歪の加わった交流の影響で、トルク変動やサージ電圧などが生じるが、挙動モデルを用いることで、これら動的特性の検証を可能にした。

(4) 交流電気回路と動力性能のモデル

モータとインバータを組み合わせた上で生じる交互作用を再現するために、Matlab/Simulink型のモータ挙動モデルを同ソフトウェア上に作成された直流電源、および三相交流インバータモデルに連結し、電気系のプラントモデルとして完結動作させた。Fig. 1の動力特性計算部の詳細フローを Fig. 4 に示す。三相交流のベクトル制御用のコントロールモデルや時系列データの検出機能も同ソフトウェア上に配置され、モータ/インバータの動的性能を記録可能とした。

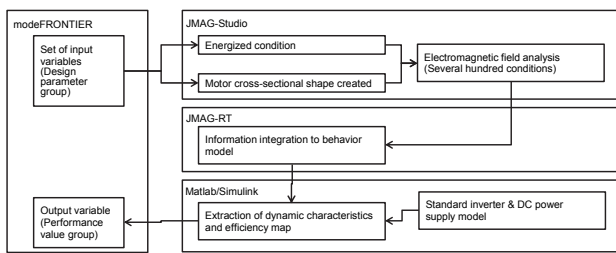


Fig. 4 Calculation Workflow of Motor Characteristics

マツダでは、Matlab/Simulinkによる車両の構想設計を推進しており、同じソフトウェアプラットフォームでモータ/インバータのモデルを作成することで、エンジンやブレーキなど直接的に協調動作を求められるシステムとの連結性を確保した。

(5) 大量の計算結果の可読性の向上

数百MBのファイルとして大量に生成される出力変数群を設計者が統合的に理解することは困難である。そこで計算結果の要点を既定の指標と同じグラフ目盛で掌握できるように独自の定型グラフの自動生成プログラムを追加した。Fig. 5に、その一例として回転数とトルクに対する交流の電流位相角の計算結果を示す。

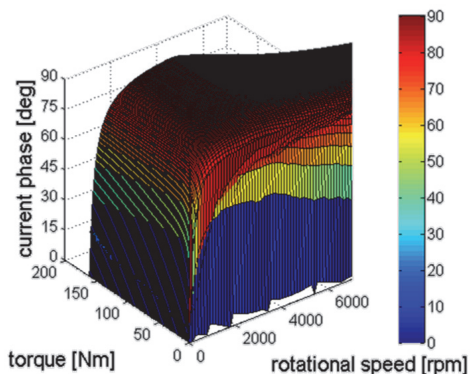


Fig. 5 Motors Drive System's Current Phase Angle Three-Dimensional Map Sample

効率を最大化する運転条件を探索した場合、電流位相角が連続的の曲面に収束すること、また原点から高トルク域と

高回転域の双方に向け、非線形的に増大を視覚的に表現することで直感的な理解を補助した。

曲面形状がIPMモータのリラクタンストルク理論や弱め界磁制御理論に沿った傾向にあることから、本計算機能が一定の妥当性を持つことを確認した。

4. 本計算手法の有効性検証

4.1 モータ断面設計固定での位相制御最適化

車両駆動用のIPMモータが、300V一定の直流電源において効率最大となるような位相制御状態を仮定して、性能計算を行い、計算結果の分析から動作検証を行った。

(1) 静的特性の検証

効率マップの生成例をFig. 6 に示す。トルクと回転数ゼロの原点から基底回転数にかけての領域、あるいは極低トルク域以外の領域では90%以上の動作効率となっており、IPMモータの特徴的プロフィールを良く再現している。当該実機 (n=1) との絶対値比較における誤差は、約2% になった。

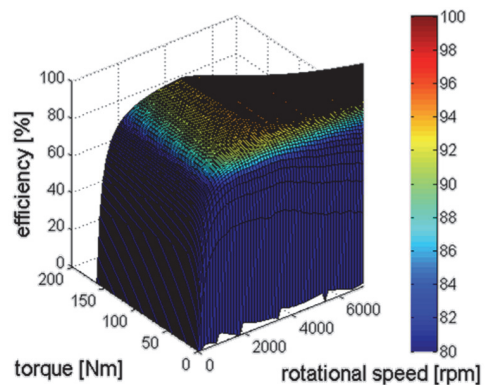


Fig. 6 Efficiency Map of IPM Motor Sample

(2) 動的特性の検証

効率マップの生成過程で、各動作点に対し都度、トルクの動的特性の収束演算を行っている一例をFig. 7 に示す。

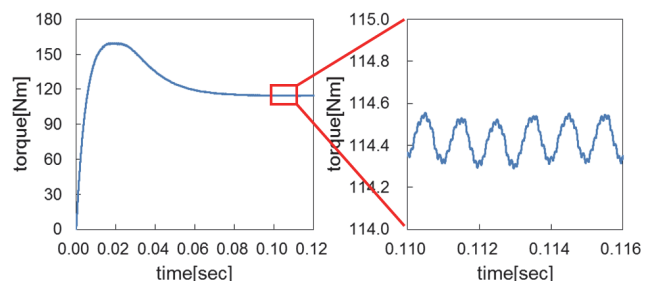


Fig. 7 Motor's Torque Ripple Behavior of Time Series Image

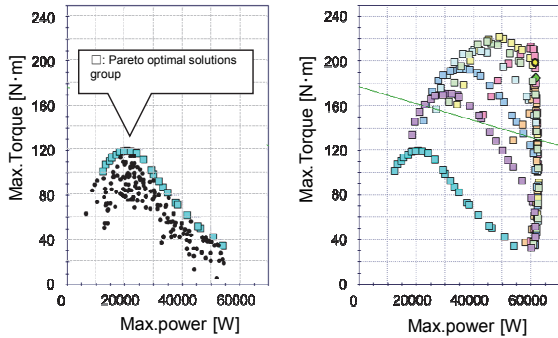
モータには、最大トルクだけでなくトルクリップルが大きなデザインもあり得るが、机上設計段階でのイジェクトを可能にした。また本稿には図示しないが、急峻なトルク

操作指令におけるサージ電圧など、電氣的な動特性も検討可能とした。

4.2 モータの電磁界断面設計の最適化

(1) 性能向上限界の俯瞰と性能向上の高寄与因子の抽出

モータ体格の制約条件を一定とした時の動力性能向上限界を掌握するために、パラメータスタディの上下限を常識的な設計者が検討しないような領域まであえて広げた事例をFig. 8に示す。左図の初回検討はロータデザインを固定してステータのみ新設計、右図ではロータ・ステータ共に新設計している。また右図のロータの断面形状は、数種類の断面設計コンセプト(色別)を用い、各々別個に設計改良を行っている。なお、右図では、それぞれのコンセプトの最良のデザイン群(パレート解)のみを選出してプロットした。



(a) Fixed Rotor Designs study (b) Variable Rotor Designs study

Fig. 8 Pareto Optimal Solutions Plot Sample

縦軸にモータ/インバータの最大トルク性能、横軸に最大出力性能を用いてプロットすると、分布にある程度の輪郭が生じた。これはモータの磁気飽和やインバータとの組み合わせによる力率操作などの技術律則によって生じる成長限界であると考えている。

最大トルクと最大出力など、複数性能の向上機能を確認した後、本データベースの約30種の入力変数と数十種の出力変数間の相関係数を分析し、動力性能向上への寄与度の高い入力変数(設計パラメータ)の選別を行った。その一部をFig. 9に示す。

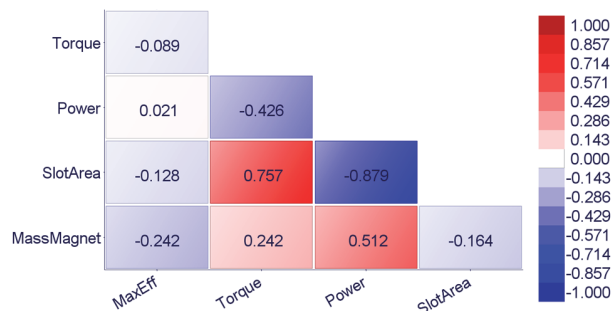


Fig. 9 The Parameter Sets a High Correlation to System Performance

変数は入力と出力を区別せず総当たりで相関係数を算出するが、重複表記を割愛するため、階段状に関係を表示する。本事例においては入力変数(設計変数)の加工値であるSlotAreaがTorqueに対して正の強い相関、Powerに対して負の強い相関を示している。あるいは変数MaxEffに対して、他の変数は相関が低いことを示している。

(2) 設計探索作業の効率向上

前述の4.2(1)の結果から得られた高寄与因子群のみを操作した場合を、Fig. 10に示す。二つの性能指標を引き上げるべく右上方向に向けてのみ、集中的に新デザインが改良されている。つまり設定した複数の目的を充足するように、目的指向で効率的に探索できるようになった。

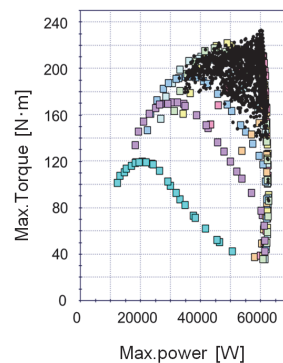


Fig. 10 Pareto Answer Solutions Plot Sample

(3) 優秀な設計群のパラメータ分布の検証

Fig. 10で選出された優秀なデザイン群の設計パラメータの組み合わせを分析した事例をFig. 11に示す。左から縦軸ごとに設計パラメータを、上下枠は制約条件を示す。高性能デザイン(太線)のパラメータの組み合わせは、必ずしも唯一解に収束するのではなく、ある程度の帯域で分散した。

IPMモータと三相交流インバータの基本特性の机上設計技術としては、今回構築した一連の計算システムが有効に機能することを確認した。しかしながら、本システムを用いて、自動車の電動系部品として仕様を最適化し、究極の設計に洗練していくには、更にマツダ固有の目的関数や制約条件の追加が必要不可欠と考える。

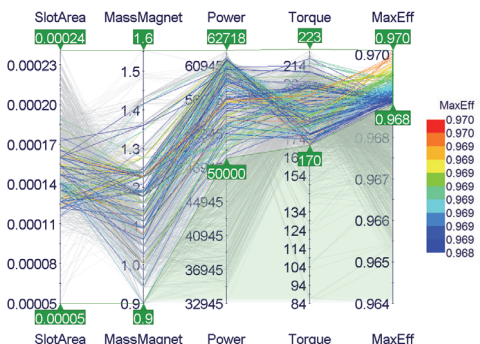


Fig. 11 Combination of Design Parameters Sample

4.3 動力特性の計算速度の向上

本計算システムの開発当初、1モータデザインあたり効率マップの生成に130時間を要していた。しかし前述のエラーデザインの事前排除、解析メッシュの自動切り直しの排除、最適運転条件の抽出法の改良などの運用ノウハウ構築により、計算サイクルタイムが200倍速となり、40分での生成を実現した。

更にコンピュータによる24時間連続操業との組み合わせにより、1000モータデザイン/月の検討作業を一人のオペレータが1回で仕掛けられ、検討能力が量的に大幅向上している。

また高寄与因子の選択操作、および計算データベースが増大して試行錯誤の経験値が蓄積されるに従い、無駄なデザインの試行錯誤が減少していくため、技術検討の質的向上を図れた。コンピュータが自動生成した電磁界設計図は、市場流通製品と類似する域に到達し、数千デザインの実践的なモータ設計データベースを得ることができた。

5. まとめ

モータ/インバータの性能モデルに最適化技術を複合し、計算サーバで高速に演算することで、電動車の構想設計におけるモータ/インバータの仕様設計を支援する計算システムを構築できた。本計算システムは、設計刷新のハードルが低いバーチャル空間内で、モータデザイン検討を1000回/月のペースで行うことで、複数目的を充足する設計へとパラメータの組み合わせを絞り込んでいくことができる。

今後は、予実差校正によりモータ/インバータモデルの高精度化を図りつつ、マツダ固有の要求を目的関数として追加し、構想設計への本格適用を行う。またモータ/インバータ挙動モデルを活用した制御ストラテジの自動育成や、動く要求仕様書としての流通を促進し、モデルベース開発の立場から“Zoom-Zoom”なクルマづくりへの進化を後押ししていく。

参考文献

- (1) 藤田ほか：遺伝的アルゴリズムによる機械システムの最適化法とそのエンジン諸元の最適設計への適用，日本機械学会論文集（C編），65巻，630号，pp.821-827（1999-2）
- (2) 小平ほか：複数性能を扱う車体構造最適化手法の開発，マツダ技報，No.29，pp.104-109（2011）
- (3) 木村ほか：CX-5 SKYACTIV-BODYストラクチャの開発，マツダ技報，No.30，pp.103-108（2012）

■ 著 者 ■



米盛 敬



板坂 直樹



栃岡 孝宏