

I. 研究開発

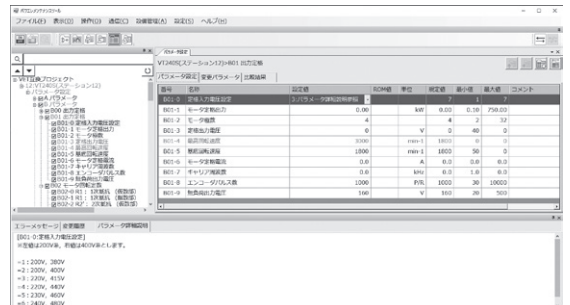
1 パワーエレクトロニクス

1-1 パワーエレクトロニクス装置用メンテナンスツール

広範囲のパワーエレクトロニクス製品へ適用できる高速通信が可能なメンテナンスツールを開発した。従来のメンテナンスツールでは、機種ごとでツールが異なり共通化を図ることができず、またツール作成から10年以上経過し機器の保守が困難であったが、本ツールはこれらの問題点を解決している。

一方、現在の製品保守・保全業務には高価な計測器が用いられている。用途に応じて計測器を切り替える必要があることなどが、業務効率低下の要因となっている。

新たなメンテナンスツールは、機器の内部データを高速で取得する機能を備え、計測器を用いない保守・保全業務を実現し、保守・保全サービスの向上が期待できる。

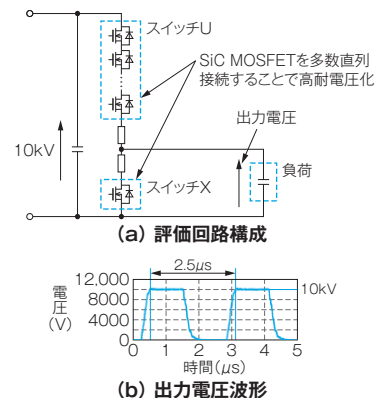


第1図 ツール画面表示

1-2 炭化ケイ素 (SiC) MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を使用した高耐電圧スイッチの基礎開発

DLC (Diamond-Like Carbon) 成膜や半導体製造、加速器用電源などの分野では、10kV以上の高耐電圧かつ100kHz以上の高周波数でスイッチングできる半導体スイッチの需要が高まっている。高い周波数におけるスイッチングの実現には、SiC MOSFETの利用が望ましいが、一般的な耐電圧は数kVであるため、直列接続で高耐電圧化する必要がある。しかし、各スイッチの駆動タイミングのずれや浮遊静電容量によって、スイッチの電圧分担が均一にならず信頼性が低下する。

そこで、独自の高周波駆動技術で各スイッチの駆動タイミングをそろえ、浮遊静電容量を低減する構造設計でSiC MOSFETの多直列接続を実現し、10kV 400kHz駆動スイッチを開発した。コンデンサ負荷で本スイッチを評価し、有効性を確認した。

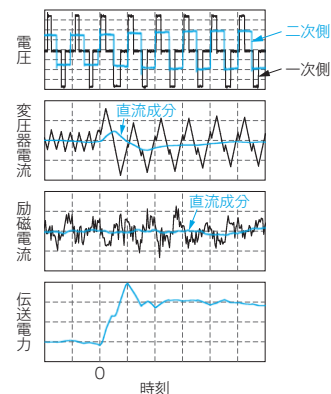


第2図 高耐電圧スイッチ評価結果概要

1-3 高周波絶縁DC/DC変換器の応答速度向上

高周波絶縁DC/DC変換器は、直流電圧を一旦高周波の交流電圧に変換し、小形・軽量の変圧器で絶縁する。当社では本変換器向けに独自のパルス幅制御方式を開発し、軽負荷や出力電圧変動時の効率を大幅に改善した。しかし、負荷急変時には励磁電流に直流成分が重畳し損失が増加するほか、変圧器が磁気飽和を起し変換器が異常停止するおそれがあった。

これらの問題への対策として、負荷急変時にパルス幅を補正する技術を開発した。30kW試作機では時刻0秒での0%→100%負荷急変に対し、変圧器電流の直流成分は5周期で減衰し、励磁電流のピークは変化せず直流成分もほぼ0を維持した。さらに伝送電力は1.5周期で指令値に追従した。負荷急変への対応を実現できたほか、変圧器の更なる小形化にも有効である。



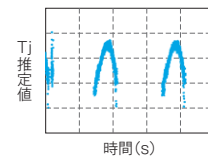
第3図 高周波絶縁DC/DC変換器の負荷急変結果

1-4 インバータ駆動中におけるパワーデバイスのジャンクション温度推定基礎開発

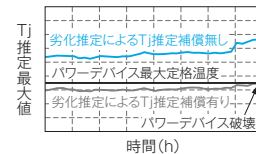
インバータには更なる信頼性の向上が求められる。信頼性向上の一手法として、パワーデバイスのジャンクション温度 (T_j) の監視が挙げられるが、インバータ駆動中の T_j を直接計測することは困難である。

そこで、パワーデバイスの電圧-電流- T_j 特性を事前に取得し、インバータ駆動中における電圧・電流の測定データと比較することで、 T_j を推定する方法を検討した。しかし、この方法はパワーデバイスが劣化すると事前取得したデータから特性が変化してしまい、温度推定誤差が生じてしまう課題があった。

そこで、このパワーデバイスの劣化を電気抵抗値として推定することで、特性変化をオンラインで補償する方式を開発し、温度推定精度を向上させた。



(a) 出力周期の T_j 推定値

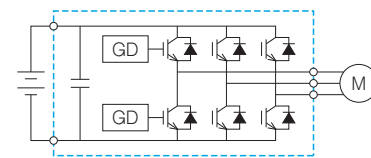


(b) 長周期における T_j 推定最大値

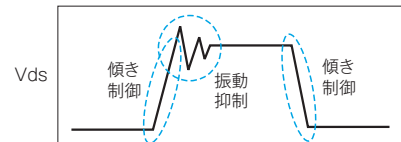
第 4 図 T_j 推定の実験結果

1-5 次世代半導体デバイス適用に向けた伝導ノイズ解析技術

電気自動車向けインバータなどのパワーエレクトロニクス製品では、高効率化や高性能化を期待して次世代パワーデバイスや高性能化した IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が適用される。性能を最大限発揮させるためにパワーデバイスのスイッチング速度を向上させるが、これに伴い発生するノイズ量は規格で規制され、今後より低周波での規制が強化されるなど、ノイズ対策技術は一層重要性を増している。これらに対応し、伝導ノイズに注目したインバータ回路解析によるノイズ対策技術と、パワーデバイスの駆動技術による傾き制御や振動抑制などのノイズ抑制技術を開発し、評価している。



(a) 解析・制御対象



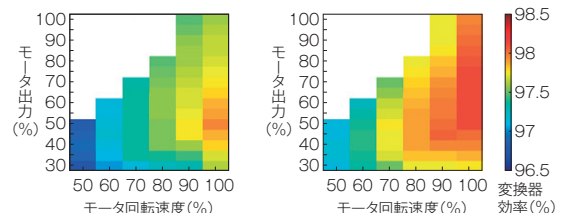
(b) ノイズ抑制駆動概要

第 5 図 伝導ノイズ解析・対策技術

1-6 固定パルスパターン方式を適用した高圧インバータの効率評価

高圧インバータでは、三角波と指令電圧を大小比較する方式 (従来方式) でパルス電圧を出力している。従来方式では、電流ひずみの増大を防ぐためにパルスの周波数を出力周波数に対して高く保つ必要がある。しかし、パルス電圧の出力では、パルス出力1回ごとに半導体損失を生じるため、高出力周波数では効率低下を招いてしまう。これに対して、固定パルスパターン方式を検討した。この方式ではパルス電圧の事前設計をすることで、電流ひずみを増大させずにパルスの周波数を減少できる。これにより、変換器効率の向上が期待される。

従来方式との比較として、モータ駆動時の高圧インバータの実機効率測定を行った。実使用領域の全域で、固定パルスパターン方式が従来方式よりも高効率であることを確認した。



(a) 従来方式

(b) 固定パルスパターン方式

第 6 図 モータ駆動時の高圧インバータ効率

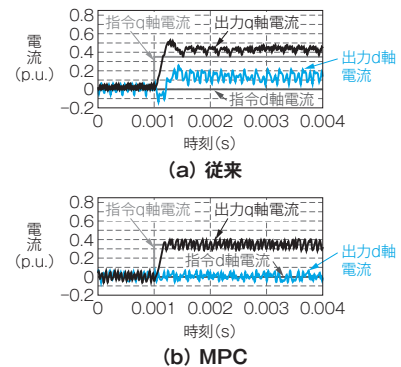
1-7 インバータ電流制御におけるモデル予測制御（MPC）の基礎開発

一般的なインバータの電流制御（従来制御）は、パルス幅変調（PWM）で生成されるパルス状の出力電圧を考慮していないため応答性に限界がある。

そこで、MPCの適用を検討した。MPCは、出力電流をパルス電圧から直接的に予測するため応答性に優れる。現在開発中の独自方式のMPCは、以下の特長を持つ。

- (1) 長期間の電流予測で電流脈動の増大を防止
- (2) 最適ゲイン設計で軽負荷運転を高効率化
- (3) モデル・ゲイン設定を現場で調整可能

シミュレーションでは、電流脈動を従来方式とMPC方式で同等程度に保ちつつ、MPCの方が瞬時に電流指令へと一致する結果が得られた。



第7図 モータ駆動における電流制御シミュレーション結果

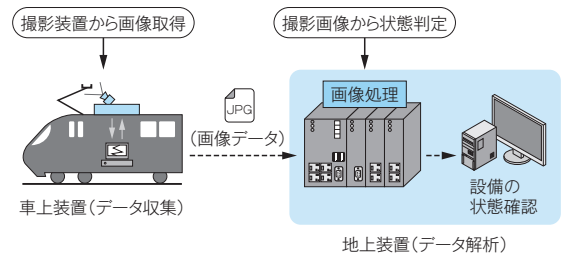
2 知能情報技術

2-1 電車線設備モニタリングシステムの開発

鉄道事業の安全運行維持のために、電車線設備点検は欠かせない業務であるが、人手による多大な労力を要するという現状がある。当社はこの課題を解決すべく、画像処理と深層学習技術を組み合わせた電車線設備モニタリングシステムを開発した（本研究の一部は(公財)鉄道総合技術研究所様と共同で実施）。

従来の架線検測装置との違いは、計測ではなく監視を目的としており、設備の見た目から状態を監視する点にある。特長として、多種の対象設備に対応でき、撮影から対象設備の状態判定までを一貫して行うことができる。

本システムを運用することで、電車線設備点検の作業の効率化及び作業員への負荷削減、さらに高精度な異常検知を実現し、鉄道設備の信頼性向上にも寄与する。



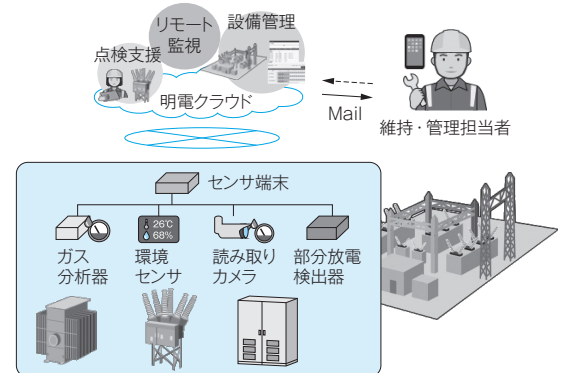
第8図 システム概要

2-2 特高変電所IoT化の概念実証（PoC）を開始

沼津事業所内に新設された特高変電所で、変電所を構成する各設備をモノのインターネット（IoT）化し、スマート保安実現のためのPoC環境を構築した。本環境では、各設備にカメラやセンサを取り付けることで、メータ指示値や設備の「入/切」などの維持・管理に必要なデータを自動収集し、クラウドへ常時蓄積する。これらのデータは点検データとして取り込まれ、点検帳票が自動作成される。これにより、点検作業工数の9割削減を見込んでいる。

また、異常発生時のメール発報、グラフによる傾向分析などの機能をクラウドサービスとして提供する。

本PoC環境では、仮説に基づいた様々なサービスの実装と設備の維持・管理担当者による評価を繰り返すことによって価値創出につなげる。

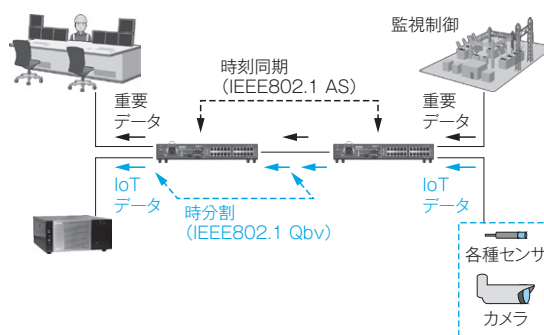


第9図 特高変電所のIoT化

2-3 時分割方式によるネットワーク技術の開発

監視制御システムの通信で、重要データに加え監視カメラや人工知能（AI）関連の大量データを扱うと、瞬間的に特定のHubでバッファ不足になりパケットを喪失するおそれがある。再送機構や優先度制御を行っても確実に重要データを通信できるとは限らない。

そこで、TSN（Time-Sensitive Networking）技術の時分割技術で重要データとそれ以外のデータに分離し、時分割送信スケジュールに従い送信することで、重要データを欠落することなく送信できるネットワーク技術を開発した。これにより、重要データの送信期間中に他のパケットを制限することで、重要データの喪失を防ぐことができ、大量データを扱うネットワークでも通信データのロバスト性を確保できる。



第10図 時分割方式ネットワークイメージ

2-4 デジタル保護継電器 ^{メディアル} MEDIMUL II の開発

デジタル保護継電器 MEDIMULの後継機種として、視認性・操作性・保守性を向上させたMEDIMUL IIを開発した。主な特長は、以下のとおりである。

- (1) 14セグ数値表示器を採用し、英字表示が可能
- (2) 操作キーを拡大、また機能別の表示で操作性が向上
- (3) 測定端子・出力ロック設定を実装し、保守性が向上
- (4) 電動機保護（2E/3E）用を開発し、ラインアップに追加
- (5) 51L限時特性に定限時、JIS形反限時、強反限時の3特性を追加し、6特性から限時協調が選択可能
- (6) 12ビットAD変換器・3.75°サンプリングを採用し、リレー精度が向上
- (7) JEC-2501・JEC-2502に準拠した性能を確保



第11図 MEDIMUL II

2-5 IoTゲートウェイ（CG2000）の開発

水道CPS（Cyber-Physical System）監視サーバ及び水クラウド監視サーバと、現場のPLC（Programmable Logic Controller）を接続するIoTゲートウェイ（CG2000）を開発した。現場ネットワークデータを取り込み、各監視サーバに送信する。主な特長は、以下のとおりである。

- (1) 水道CPS監視サーバとはオープンな国際標準規格のOPCUA（OPC Unified Architecture）プロトコルで接続し、水クラウド監視サーバとはTELEMOTプロトコルで接続
- (2) 活性汚泥モデル（ASM）を活用し、下水処理水質変動を解析
- (3) ホワイトリスト方式のセキュリティ機能を実装
- (4) アナログ入力（AI）512量・接点入力（DI）2048点の監視及びアナログ出力（AO）・接点出力（DO）の制御が可能



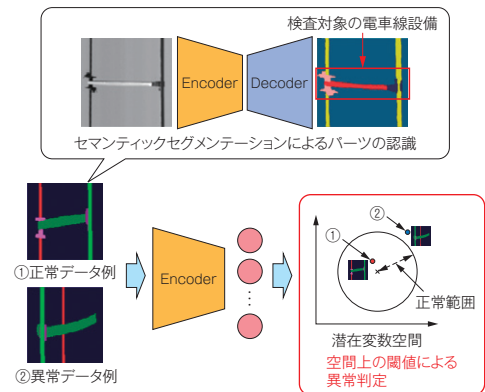
第12図 IoTゲートウェイ（CG2000）

2-6 少量異常データを用いた異常検知技術の開発

電車線設備点検の省力化と効率化を目的として、大量に得られる設備の正常データと、まれに得られる設備の異常データを学習に活用した異常検知技術を開発した。

電車線設備の異常には、設備の金属部分の曲がり・割れ・欠け・外れや設置位置のずれなど様々ある。その中で形状異常に着目し、セマンティックセグメンテーションと少量異常学習ができる深層学習の異常検知手法を併用することで、高精度に異常検知を行う手法を開発した。本手法は、特に少量異常データを利用しない場合に検出が困難であった正常状態に似た異常や、画像中の小さな異常に対して高精度な検出を実現した。

本開発は、(公財)鉄道総合技術研究所と(大)静岡大学の大橋教授との共同開発である。

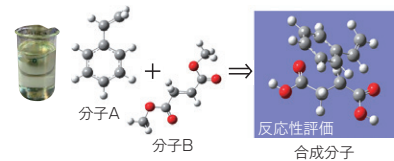


第13図 異常検知概略

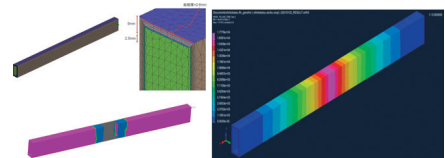
3 材料技術

3-1 環境対応型ワニス開発

絶縁ワニスは液状の樹脂から成り、回転電機のコイルに用いられ、電気絶縁材料の中でも基幹的役割を持つ。絶縁ワニスには大気環境負荷となる成分が含まれるものがあり、製造時の温室効果ガス（GHG）低減と同時に環境負荷低減のための組成改良が必要である。第14図は、計算化学的にワニスの環境負荷成分を環境にやさしい成分へと置き換えた際の分子構造である。また第15図は、製造時の大気環境負荷低減を考慮した最適なエネルギーでワニスを含浸するシミュレーション結果の一例である。これらの解析に基づく材料検討から、当社が使用するワニスのうち二種類が環境負荷物質フリーな組成へと変更できることを確認した。引き続き、当社が使用する全てのワニスで環境負荷物質フリーへの対応を目指す。

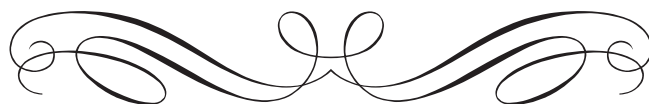


第14図 ワニス組成解析

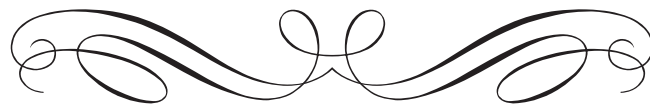


第15図 ワニス含浸シミュレーション

3-2 一方向性炭素繊維強化プラスチック（CFRP）リングの評価手法



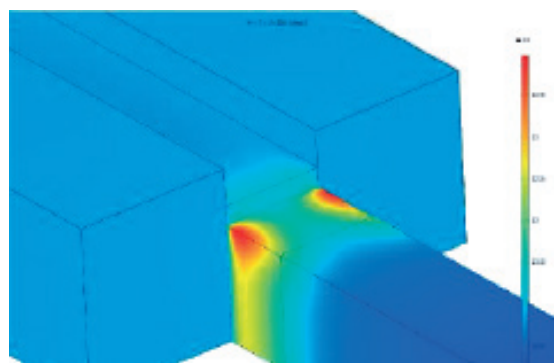
3-3 避雷器用酸化亜鉛素子 (ZnO) の高抵抗化



3-4 高周波高電圧電動機巻線絶縁評価技術

省資源・高効率化による環境負荷低減を目指した高速流体機械への要求の高まりから、永久磁石同期電動機 (PMモータ) は、更なる大容量高速化が求められている。これに伴い、モータ巻線には高電圧高周波制御に適応した低損失、高信頼性な絶縁システムが必要となってきた。

第19図はマルチフィジクスツールを用いた巻線のモデル化と高周波電界解析による発熱損失部位の一例である。構築したモデルによる種々の検討から、新規に低損失な高周波電界緩和絶縁システムを設計した。現在、最適な特性を持つ新しい材料の開発と検証を行っている。



第19図 電界-熱連成解析モデルと結果の一例

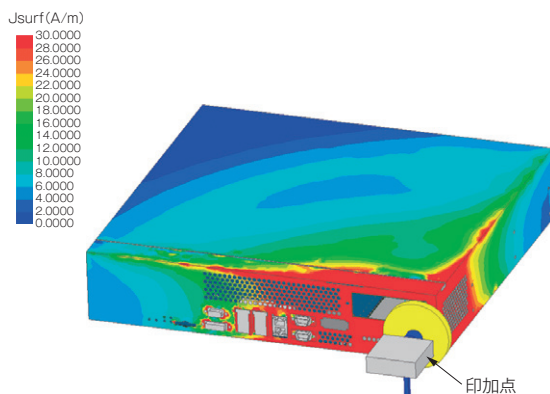
4 共通基盤技術

4-1 静電気ノイズ解析技術の確立

半導体デバイスの低電圧化及び高速化によって、静電気ノイズに対する耐電圧を確保することが困難になっている。従来では、実機によるイミュニティ試験で耐量を確認し、対策と試験を繰り返すことで必要な耐量を確認していた。しかし、製品を早期に市場投入するためには、開発の上流段階での対策が必要不可欠である。

そこで、電磁界解析ツールを用いた静電気ノイズの解析技術を確立した。プリント板及びユニットの解析モデルを作成して解析することで、静電気ノイズの印加で引き起こされる電磁界分布を可視化することや特定の信号線への影響を確認できる。

これにより、設計段階で静電気ノイズに弱い部分を推定し、事前対策及び不具合の未然防止を実現できる。



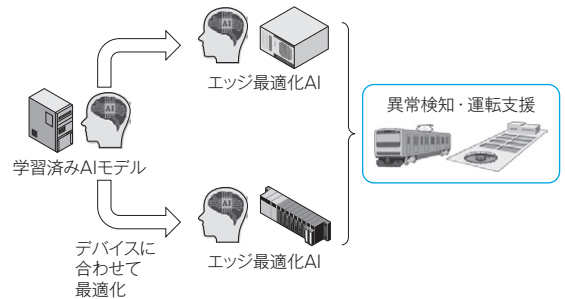
第20図 ユニットの電流密度分布

4-2 画像情報のエッジ人工知能 (AI) 最適化技術

近年、画像情報を基に異常検知や保守・運転支援を行うAIの開発が進められている。このAIを耐環境性・長期信頼性の高い産業用コントローラでの運用が求められる当社事業領域で活用するには、エッジAI最適化が必要である。

学習済みAIモデルを当社製コントローラで採用される各種プロセッサのそれぞれに最適化することで、GPU (Graphics Processing Unit) などのデバイスを使用せずに実時間内でAIの演算が実行できる。また、AIモデル内部の数値精度を量子化することで、更なる高速化も実現している。

本技術を水処理施設の運転支援や電鉄架線検測でのAI活用に適用を進めており、信頼性の高いAIシステムの構築に取り組んでいる。



第21図 エッジAI最適化技術の適用イメージ

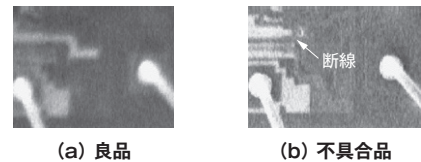
4-3 半導体部品の非破壊故障解析手法

半導体集積回路などの故障解析では、モールド樹脂を溶解し、チップ表面にプローバーを当てて電氣的に故障箇所を特定する手法を用いる。しかし、接触不良やチップへのダメージなどによって、正確な解析ができないおそれがある。

今回、デバイスに電圧を印加し、走査電子顕微鏡 (SEM) の二次電子像を活用する方法を確立した。試料をSEM試料室内に設置し、外部電源で試料に電圧を印加する。試料表面が正の電位を持つと試料から放出される二次電子の一部が吸収され、検出量が低下し、画像が暗くなる。逆に試料表面が負の電位を持つと試料から放出される二次電子の検出量が増え、画像が明るくなる。これにより画像のコントラストを観察し、試料の相対的な表面電位を知ることができ、非破壊で良品・不良品を判別できる。



第22図 電位コントラスト法解析装置

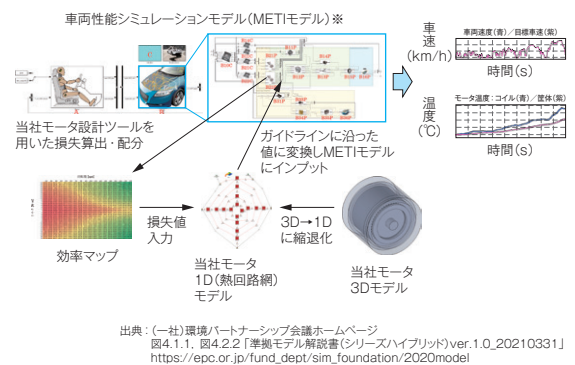


第23図 IC回路網の電位コントラスト像

4-4 車両性能シミュレーションモデルに対応したモータ温度予測モデルの開発

産産間 (自動車メーカーと部品メーカー、部品メーカー間) でモデルを流通させモデルベース開発 (MBD) を普及させるため、モデル間のインタフェースを定義づける「ガイドライン」及びステークホルダ間での流通時共通基盤としての「車両性能シミュレーションモデル (METIモデル)」を経済産業省が公開している。

これらのモデルをモータ熱設計に活用するため、METIモデルに組み込めるモータ熱回路網モデルを開発した。走行モードから得られる回転数・トルク・効率から損失値を計算し、各部材へ配分する。詳細な熱回路網で得られた温度結果をガイドラインに沿った値に変換して返すことで、METIモデル内で動作可能にし、車両システム内におけるモータ温度・冷媒温度挙動の計算を実現した。



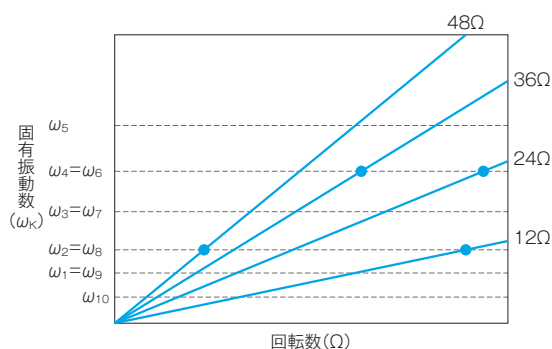
出典: (一社)環境パートナーシップ会議ホームページ
図4.1.1、図4.2.2「準拠モデル解説書(シリーズハイブリッド)ver.1.0_20210331」
https://epc.or.jp/fund_dept/sim_foundation/2020model

第24図 車両性能シミュレーションモデルとモータ熱回路網連携イメージ

4-5 アウターロータ型モータの共振条件の検討

永久磁石同期電動機（PMモータ）は、多くの産業用途に広く使用される。近年では高速化や高出力密度化が進んでおり、電磁加振が増加し音振動の問題が発生している。当社では、これまでインナーロータ型モータの共振条件を検討したが、アウターロータ型モータはインナーロータ型モータと異なり、固定子ではなく回転子が音源となる。その座標系の違いに着目し、インナーロータ型モータの振動理論をアウターロータ型モータへ適用することで、アウターロータ型モータの共振条件を明らかにした。さらに実験結果との比較検討によって、共振条件の妥当性を確認した。

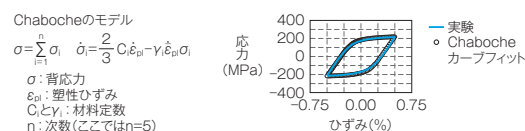
この研究成果を応用することで、種々のモータの共振回避設計ができ、回転機の音振動特性向上に貢献できる。



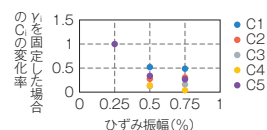
第25図 アウターロータ型モータの共振条件

4-6 純銅の繰り返し応力ひずみ曲線に関する研究

製品の信頼性向上を実現し、タイムリーに市場に投入するためには、設計時点での製品寿命の予測技術が重要となる。このため、多数回の利用によって材料特性が変化する特徴のある銅材料について、機械設計に必要な応力・ひずみ関係の変化予測が望まれていた。これらの技術を確立するため、まず環境温度やひずみ範囲を系統的に変えた応力ひずみ曲線を実験的に取得した。取得した曲線の特徴から、応力の上限を表現でき、かつ加工硬化を考慮できるChabocheモデルと呼ばれる材料モデルが適していることを見いだした。種々の実験に対して材料モデルの係数を算定し、実験と解析で得た応力ひずみ曲線を対比した結果、両者はほぼ一致する結果が得られた。これにより、熱変形や任意形状の疲労寿命推定を検討できることが示唆された。



第26図 応力ひずみ曲線の比較（温度100℃、ひずみ振幅0.5%の場合）



第27図 各実験に対するChabocheモデルの材料定数変化