

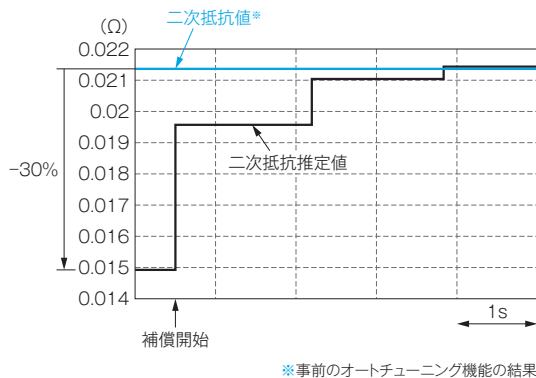
I. 研究開発

1 パワーエレクトロニクス

1-1 インバータの二次抵抗補償機能

インバータによる誘導電動機の制御では、その誘導電動機の回路定数の推定誤差が制御性能に影響する。特に長時間運転などによって二次抵抗値が変動することで、トルク制御性能が低下してしまう。

そこで、運転中の二次抵抗値を補償するインバータの機能を開発した。本機能は、二次抵抗値の推定誤差の大きさによって、出力電圧の理論値と出力値の差が変動することに着目して二次抵抗値を補償するため、低速の回生運転など推定が困難とされる条件でも有効である。実機検証で、二次抵抗値の推定誤差を30%とした場合から補償機能を使用することで、数秒で推定誤差を0.3%程度に抑制できた。これにより、トルク制御の指令値と出力値の誤差も低減され、トルク制御性能が向上する。

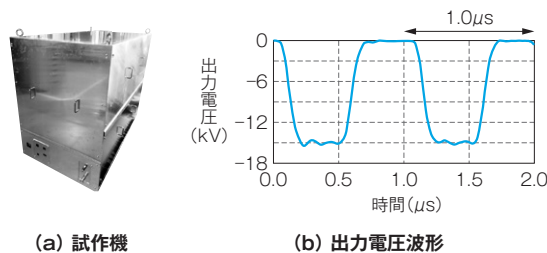


第1図 二次抵抗補償結果

1-2 炭化ケイ素 (SiC) MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を使用した 15kV 1MHzパルス電源の基礎開発

Diamond-Like Carbon (DLC) 成膜や半導体製造などの分野では、10kV以上の高電圧かつ100kHz以上の高周波を出力できるパルス電源の需要が高まっている。高周波化の実現には、SiC MOSFETの利用が望ましいが、一般的な耐圧は数kVで、直列接続による高耐圧化が必要である。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、独自の駆動技術で各スイッチの駆動タイミングをそろえ、かつ浮遊静電容量を低減する構造に設計することで、15kV耐圧のSiC MOSFETスイッチユニットを実現した。さらにユニットを並列接続することで高周波化し、15kV 1MHzパルス電源を開発した。コンデンサ負荷を用いて本装置を評価し、有効性を確認した。

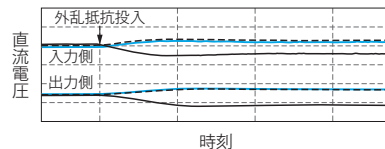


第2図 評価結果概要

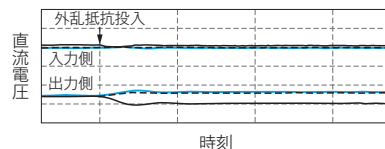
1-3 直列接続に対応した高周波絶縁DC/DC変換器

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するため、小形・軽量のトランスで絶縁でき、再生可能エネルギーや電気自動車 (EV) の活用には不可欠で、今後、大容量化や高速充電のため高電圧化の需要が高まることが予想される。この需要には変換器の直列接続で対応できるが、各変換器にかかる電圧のバランス維持が困難なため破壊のおそれがあった。

上記問題に対し、電力出力側は自発的なバランス維持を促し、電力入力側のみ能動的にバランス制御を行い、特に不安定になりやすい条件に限り損失を活用して、過剰な電圧を放電する新たな技術を開発した。変換器3台構成の16kW試作機による評価では、追加回路を必要とせず電圧バランスのずれを抑制できることを確認した。



(a) 制御なし(電力入力側・出力側ともにアンバランス)



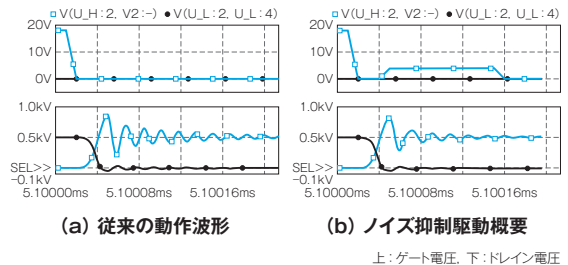
(b) 制御あり(入力側はほぼ等しく出力側もずれが小さい)

第3図 直列DC/DC変換器の電圧バランス実験

1-4 リンギング抑制駆動技術

電気自動車や産業用インバータなどのパワーエレクトロニクス製品では、高性能化を期待して次世代パワーデバイスが適用される。高性能化のためにはスイッチング速度を向上させるが、次世代パワーデバイスでは、従来のパワーデバイスと比較してリンギング（パワーデバイスが電流を遮断した後にドレインソース間電圧が振動する現象）が大きく、これがノイズや性能が低下する要因となる。

これに対して、パワーデバイスにリンギングのエネルギーを吸収させ、リンギングが発生する期間のゲート電圧を制御することで、リンギングが収束する時間を短縮するパワーデバイスの駆動技術を考案した。

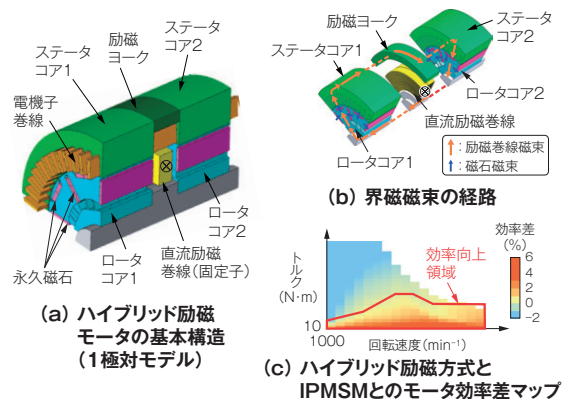


第 4 図 リンギング抑制駆動技術の適用効果

1-5 ハイブリッド励磁方式による電動車駆動用モータの高効率化

電動車駆動用モータの高効率化には、車両走行時に常用される低トルク領域の損失低減が肝要である。現在、駆動モータは主に埋込磁石式同期電動機 (IPMSM) が採用されている。永久磁石の界磁は一定で、高トルクを出力可能な高界磁設計がなされることから、低トルク領域では余分な界磁磁束によって損失が増加し、効率が悪化する課題がある。

そこで、回転子に必要な最小限の永久磁石と固定子に変磁束用の励磁巻線とを持つハイブリッド励磁モータを開発した。本モータは、励磁巻線に直流電流を流すことで界磁磁束を可変することができる。界磁磁束を動作点に応じて最適化することで、低トルク領域のモータ効率が向上することをシミュレーションで確認した。

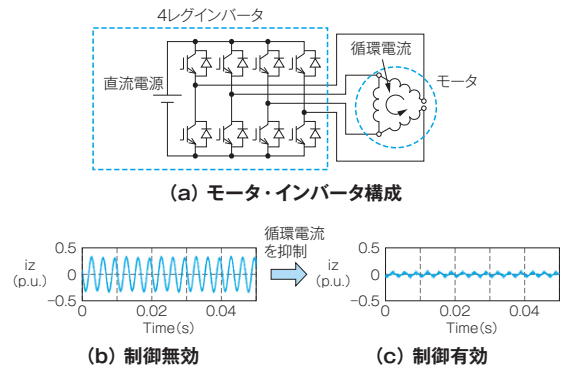


第 5 図 ハイブリッド励磁モータの基本構成と効率差マップ

1-6 デルタ結線永久磁石式同期電動機 (PM モータ) の循環電流抑制方式

モータの高出力密度化のため、モータの高速化の要求が高まっている。PM モータでは、モータの回転数に比例した誘起電圧が生じるため、高速になるほど高い電圧を印加する必要がある。

一方、インバータの最大出力電圧は直流電源の電圧によって決まるため、限界がある。モータに印加する電圧を向上させるため、モータにデルタ結線を適用する方法があるが、デルタ結線にすると巻線間に循環電流が流れるため、発熱や効率低下を招く。この循環電流は、モータ内部で流れるため検出が困難で、通常制御によって抑制できない。この課題に対して、デルタ結線モータの三角結線の一点を開放して4レグのインバータを接続する構成を適用し、循環電流を抑制する独自の制御方式を開発し、シミュレーションでその効果を確認した。



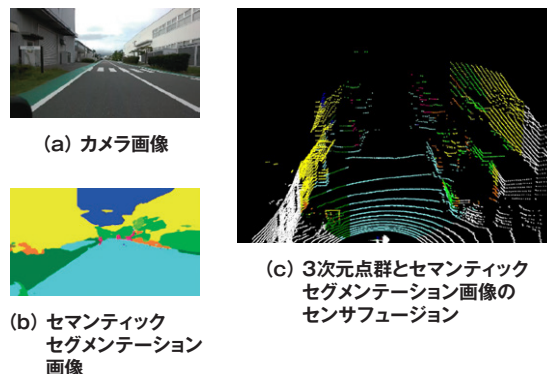
第 6 図 モータ・インバータ構成と循環電流抑制制御のシミュレーション結果

2 知能情報技術

2-1 3次元点群とセマンティックセグメンテーション画像のフュージョンによる無人搬送車 (AGV) 経路生成技術の開発

測距センサ (LiDAR) を利用して走行するAGVは、周囲の物体との距離を計測し、事前に作成した地図とのマッチングによる自己位置推定及び経路生成、経路追従によって走行している。しかし、距離計測のみでは前方地面が走行にふさわしいか判断できず、舗装路面以外の芝生やグリーンベルト (路側帯の緑色のカラー塗装) などを走行する可能性がある。

そこで、カメラ画像のセマンティックセグメンテーション (画素ごとの物体識別技術) による物体認識結果をLiDARで計測した3次元点群に重ね合わせるセンサフュージョン技術で前方の物体を認識し、適切なルートを走行する技術を開発した。また、開発したAGV経路生成技術を用いて、当社沼津事業所内を適切なルートで自律走行できることを確認した。



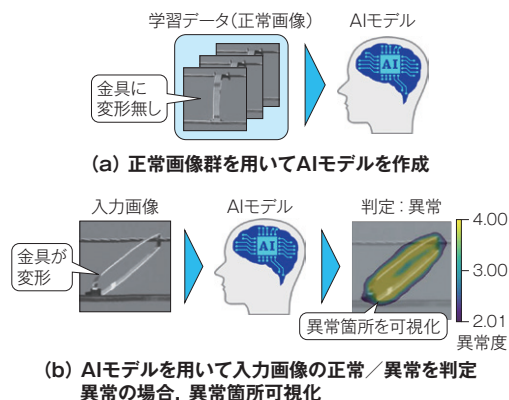
第7図 センサフュージョンの例

2-2 人工知能 (AI) による異常検知技術の開発

鉄道を安全に運用するためにメンテナンス作業は必須であり、その検査作業の一つとして設備の目視検査がある。目視検査は、人的・時間的コストが高く効率化が望まれている。

そこで当社は、深層学習を用いた目視検査の自動化の技術を開発した。開発した異常検知技術では、正常な架線設備の画像を学習させてAIモデルを作成する。検査時には作成したAIに対して検査対象の画像を入力し、その画像に対しての正常/異常を判定する。また、異常判定された場合には、画像内のどの箇所 (ピクセル) に異常が発生しているのかを算出した異常度に基づき可視化を行う。

本開発は、(公)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。

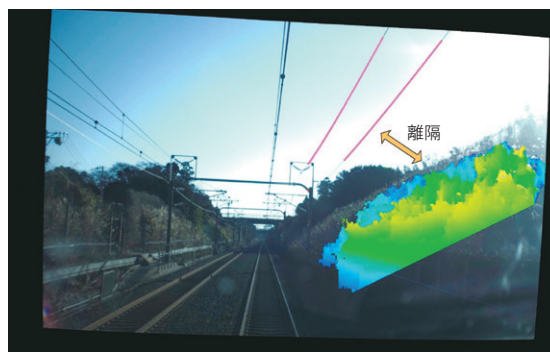


第8図 AIによる異常検知

2-3 支障樹木検知システムの開発

鉄道分野における設備点検項目の一つに、電車線路設備に接触するおそれのある支障樹木などとの離隔検査があり、従来目視を中心とした巡回検査で実施されている。しかしながら、目視による巡回点検には多大な労力を要する上、作業員の主観による部分が大きいため定量評価ができないといった課題がある。

本システムは、鉄道車両に前方撮影用のステレオカメラを設置する。特長技術として、撮影した画像から電車線検出と対象物のステレオ計測を同時に行うことで、通常ステレオ計測では難しい電車線と支障樹木との離隔計測ができる。これにより、目視点検の代替手法として、コスト削減及び定量的な点検評価ができる。また、本システムは簡素な構成のため、鉄道以外の他分野への応用も期待できる。



第9図 離隔計測画像

3 材料技術

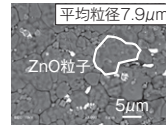
3-1 避雷器用酸化亜鉛素子高抵抗化メカニズム解明

小形化避雷器の需要拡大に伴い、動作開始抵抗を高めた避雷器用酸化亜鉛素子の開発が要求されている。

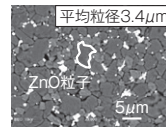
今回、素子高抵抗化に対する希土類酸化物の作用メカニズムを新規分析手法（FIB-SEM/EPMA）の適用によって明らかにし、良好な非直線抵抗特性を持つ高抵抗素子を試作した。

集束イオンビーム（FIB）加工によって元素定量精度を向上させ、希土類含有相が粒界粒子として存在することを明らかにした（第11図）。粒界粒子は、焼結進行時に発生し高抵抗化を誘導するため、当粒界粒子を形成する原料添加物を成形体素子中に均一分散させることが、良好な非直線抵抗特性発現では重要となる。

本開発成果による素子積層数約30%低減に伴い、ガス絶縁開閉装置（GIS）用避雷器の小形化の実現が期待される。

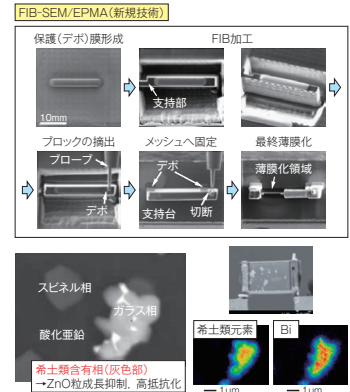


(a) 従来配合



(b) 開発配合

第10図 素子内部微構造



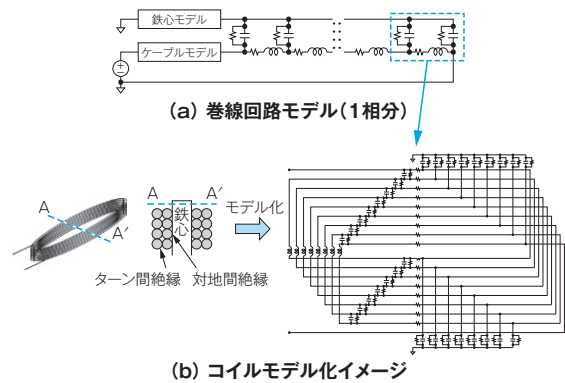
第11図 FIB-SEM/EPMA

3-2 回路網解析によるインバータ駆動回転機巻線の評価技術

近年、回転機を駆動するインバータは、駆動電圧・周波数増大及びスイッチング高速化傾向にあり、これによる回転機巻線への電気的負荷の増加が課題となっている。

この評価のため、回路解析ソフトLTspiceによる回転機固定子巻線コイル間・ターン間電圧推定を行った。第12図(a)は巻線1相分の最も簡単な等価回路で、1コイルを細分化した回路モデル（第12図(b)）を(a)に組み込み解析した。スイッチング時間が数100nsかつコイル始端と終端が隣接するなどの条件がそろった場合、エナメル線の放電開始電圧を超える可能性があることが分かった。またフィルタなど対策を行うことで巻線への負荷抑制ができることを確認した。

本技術を活用した設計を行い、信頼性の高い製品を提供する。



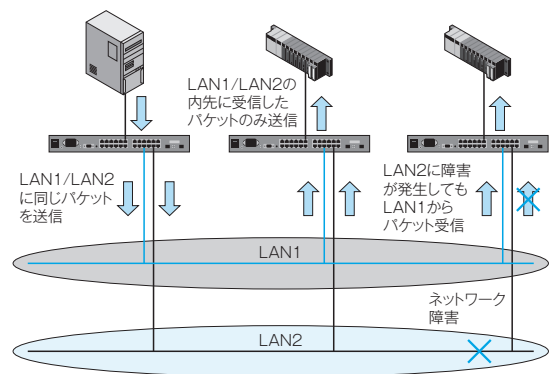
第12図 巻線回路モデル

4 共通基盤技術

4-1 通信冗長化技術PRP（Parallel Redundancy Protocol）の基礎開発

IEC 62439-3規格で定められている冗長化プロトコルPRPを用いた冗長化ネットワーク技術を開発した。国内の電力会社ではIEC 61850を適用した変電所のデジタル化が進められ、堅ろうなネットワークとしてPRPの適用が検討されている。RSTP（Rapid Spanning Tree Protocol）など、標準化された冗長化プロトコルは複数存在するが、多くは障害発生時に短時間のダウンタイムが発生する。PRPはネットワークを二重化し、同じパケットを二つのネットワークで通信させるため、片方のネットワークに障害が発生した場合でも、問題なく通信ができる。

今回技術開発したPRPを用いることで、通信障害が許されないインフラネットワークなどで、ダウンタイムゼロのネットワークを構築できる。



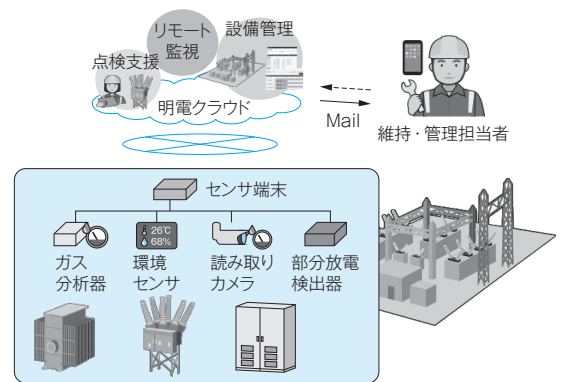
第13図 PRPネットワークイメージ

4-2 特高変電所のIoT化によるスマート保安の実現

一昨年8月に、当社沼津事業所内に新設された特高変電所で、スマート保安実現のための概念実証（PoC）を実施してきた。本施設へは、(1)ドライエア絶縁やパームヤシ絶縁油を用いた環境配慮型機器の採用、(2)カメラやセンサなどモノのインターネット（IoT）・情報通信技術（ICT）機器によるスマート保安の機能強化、(3)巡視点検項目の変更と自動化などを実施した。

点検業務のIoT・ICT機器による自動化と人による点検とのバランスを、投資対効果を見ながら課題に対して対策を重ね、スマート保安として認定された。これにより保安規定の見直し及び巡視点検、停電を伴う年次点検の期間延伸を実現した。

引き続き、特高変電所で仮説に基づいたサービスの実装と検証を繰り返し、新たな価値の創出につなげる。



第14図 特高変電所のIoT化

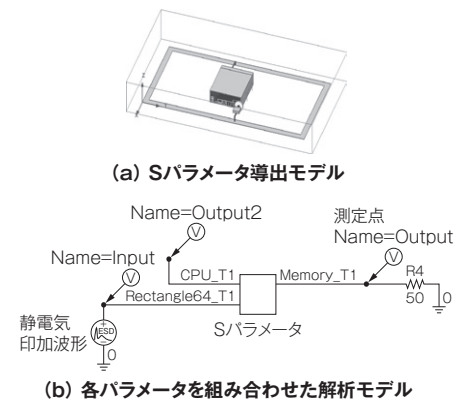
4-3 周波数領域解析を用いた静電気ノイズ解析技術の確立

昨年確立した静電気ノイズ解析技術は、時間領域による解析を行っているため、精度の高い解析ができ、問題解決の手法として有効である。しかし解析時間が長いため、開発期間短縮が求められる昨今の製品開発では、課題となっていた。

この課題を解決するため、周波数領域による解析を用いた静電気ノイズ解析技術を確立した。

本技術は、周波数領域を用いて、筐体と基板を組み合わせたモデルからSパラメータを算出する。得られたSパラメータと静電気試験で使用する静電気ガンの印加波形・周囲環境などを組み合わせて解析することで、測定箇所の電圧・電流が得られる。

この手法を用いることで、昨年習得した解析手法から、解析時間の50%削減を実現した。

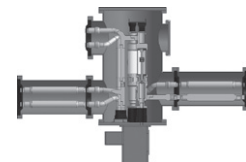


第15図 周波数領域解析を用いた静電気解析モデル概要

4-4 スイッチギヤ通電時の温度評価技術向上

スイッチギヤ製品の定格電流通電時における温度上昇試験評価で、熱流体解析（Ansys CFX）評価技術の精度向上が重要である。このため、熱流体解析で使用する主回路導体部における発熱量及びコンタクト部における熱抵抗について検討した。

回路導体部における発熱量は、電磁界解析によって算出するが、解析モデルを見直した結果、真空インタラプタ内部の発熱量は従来の約3倍増加した。また、コンタクト部における熱抵抗を実測した結果、理論計算値とほぼ一致し、熱抵抗は従来の2倍以上となった。本検討結果を熱流体解析に適用することで、スイッチギヤ通電時の温度評価技術における精度が上がった。



第16図 解析モデル



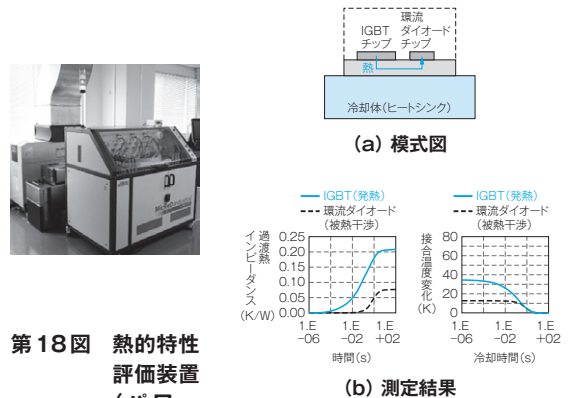
第17図 解析結果

4-5 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 近接素子間の熱的特性測定手法

半導体デバイスの特性に、半導体チップ（発熱源）から周囲空間までの熱抵抗がある。半導体デバイス適用製品は、この値を用いて半導体デバイスが定格温度を超えないように設計される。

近年、パワー半導体モジュールは小形化や高密度化が進み、IGBTと近接する環流ダイオードの間で、お互いの発熱が相互に影響を及ぼす課題（熱干渉）が顕在化している。

今回、近接素子への熱干渉を測定する方法を開発した。この技術によって、IGBTを通電加熱した際の近接する環流ダイオード素子、及び環流ダイオード加熱時の近接IGBT素子の接合温度・過渡熱インピーダンス・熱抵抗を評価することができ、半導体デバイス適用製品の熱設計の品質を高める高度な熱的特性測定を実現した。



第18図 熱的特性評価装置 (パワーテスタ)

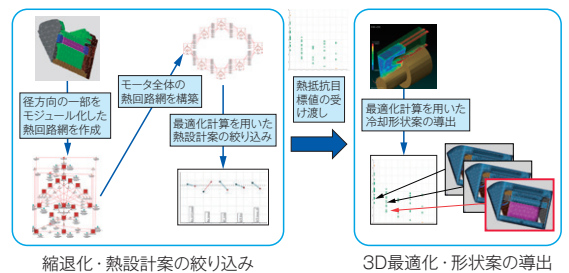
第19図 近接素子間の熱的特性

4-6 回転機の熱設計支援システムの開発

回転機製品のパワー高密度化に向け、高度な熱設計が要求されている。現状、熱設計案の評価は実験機による温度評価が主流で、解析によって熱設計案を定量的に評価・比較し、改善することが十分にできていない。

これらの課題を解決するため、径方向の一部分をモジュール化した熱回路網を組み合わせることで、モータ全体の熱回路網を構築する縮退化方法と最適化計算を用いた熱設計案の評価方法を確立した。また、作成した熱回路網を用いて算出した目標とする熱抵抗を満たすための形状最適化計算方法を確立した。

上記の解析技術の確立によって、より冷却効率の高い熱設計案を早期に効率よく絞り込み、3D形状に落とし込むことができた。

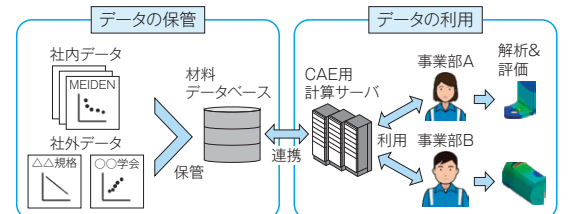


第20図 熱設計支援システムの概要

4-7 材料データベース導入によるCAE (Computer Aided Engineering) 業務の円滑化

当社ではCAEを利用し、製品の耐久性を評価している。このようなCAE業務では材料データを必要とするが、材料試験結果がまとめられた報告書などから必要な材料データを得るには労力を要する。一方、社会的にデジタルトランスフォーメーション (DX) が推進される中、データベースが注目されている。CAE分野では材料データベースの市販化が進み、必要とする機能に応じて材料データベースを選択できるまでになった。

そこで、CAE業務の円滑化を目的に、データの管理・検索・閲覧の利便性に優れた材料データベースのAnsys Granta MI Proを導入した。この材料データベースを既存のCAE利用環境と連携させ、材料データの保管から利用までを一貫する環境を構築することで、全社的なCAE業務の円滑化が期待できる。



第21図 材料データベースの運用形態のイメージ