

令和3年度 重要技術管理体制強化事業

我が国における X線 CT を用いた CPE 体制構築可能性調査

調査報告書

(公開版)

令和4年3月

サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合

目次

第1章 事業の概要	1
1-1 事業の背景・目的及び目標	3
1-2 体制	4
1-3 成果概要	4
第2章 本論	7
2-1 製品の計測、材料・回路・半導体分析、データ化	9
2-1-1 X線CT及び光学系スキャナーなどによる製品の構造・電気配線等非構造 部品の配置の計測	9
2-1-2 製品の分解による個別部品の材料分析（機械特性、物性計測）・半導体の 分析、非分解での回路の特性計測	14
2-1-3 CAE（Computer-Aided Engineering）のためのデータベース管理手法の 検討	16
2-2 CAEモデル化、シミュレーション	18
2-2-1 3Dデータ化、CAEモデル化による衝突、EMC（Electromagnetic Compatibility）、 エネルギーマネージメント等各シミュレーションの実施と検証	18
2-2-2 CAEモデル化に必要なデータ構造検討	30
2-3 BOM（Bills of Material）分析	32
2-3-1 主要コンポーネントのBOM分析	32
2-4 本調査の目的を達成するための我が国体制の在り方の検討	33
2-4-1 我が国におけるCAEサービス提供の仕組みの検討	33
2-4-2 我が国におけるX線CTを用いたCPE体制構築可能性の検討	35
2-4-3 海外における先行事例の調査・分析	37
第3章 まとめ	39

第1章 事業の概要

1-1 事業の背景・目的及び目標

自動車産業ではCASEと呼ばれるパラダイムシフトが進んでおり、その中でコアとなるテクノロジーが変化し、新興メーカーの台頭に見られるように産業構造の変革に直面している。そのため自動車産業に関する技術・イノベーション動向を継続的に把握することは、極めて裾野が広い国内の自動車関連企業の競争力の維持・強化のため喫緊の課題であり、実行可能なところから着実に進める必要がある。近年、超大型 X 線 CT 装置で車両丸ごと一台をそのまま撮像し、そこからの画像解析により構造部材・部品や配線などの配置と部品への分解・デジタル化し、実部材・部品からのデータと統合して 3D-CAD データとして販売されるようになってきている。これらのデータを使って、高度で快適な運転制御のためのシステム設計や衝突シミュレーションをはじめとする CAE への活用など、電気自動車の新規の開発プロセスの短縮化が急速に進展している。こうした製造技術の川上から川下までの企画、設計、試作、認証、生産等全体をサイバー空間で迅速かつ効率的に支援する技術、すなわちサイバー・フィジカル・エンジニアリング (CPE) は、自動車産業だけでなく、他の産業全体にも今後拡がると考えられる。一方、産業界全体にドイツ・インダストリー4.0、米国・インダストリアルインターネット、中国・中国製造 2025、日本でも Society5.0 など、グローバル化、IoT (モノのインターネット) 化、AI 化による新たな産業革命と言われる技術革新の概念が各国で打ち出されている。CPE 技術はこれらの概念を具体的な工学として扱う方法の一つであり、ものづくりにおける計測・設計・シミュレーションにおける新しい情報基盤を構築するものである。先行して取り組む事で、国内の中堅・中小企業も含めた産業活性化に資するものと考えられる。

我が国においても直ちに CPE に関する広範なデジタル技術の調査研究を実施し、ベンチマーキングと共に先行実施可能な試験研究を開始する必要があると考えられる。

技術進化の著しい最新の中国製電気自動車を例にして、部品の 3D 計測 (車体の中での三次元的な配置とそれぞれの形状の計測) と材料分析によるリバースエンジニアリングを行い、そのデータを元にした、各種 CAE シミュレーションモデルの作製と、得られたシミュレーションの検証など一連の基盤技術の試験研究



図 1-1-1 サイバー・フィジカル・エンジニアリングの概念図

を行い、また海外先行技術との比較など技術動向を把握する。これらにより、CPE 技術の現時点での課題や今後の方向性などを明確にし、我が国製造業の設計生産情報の新しい展開に貢献するとともに、安全保障上で懸念されるリバースエンジニアリングによる技術情報流出対策に資することを本事業の目標とする。CPE 技術の概念を図 1-1-1 に示す。

1-2 体制

サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合の令和 3 年度設立時の組合員は、下記の 11 社である。また、組織体制図を図 1-2-1 に示す。

株式会社アーク

AZAPA 株式会社

アルゴグラフィックス株式会社

インテグレーションテクノロジー株式会社

株式会社エフテック

株式会社構造計画研究所

株式会社ジーテクト

株式会社先端力学シミュレーション研究所

株式会社ニコンソリューションズ

株式会社フィアロコーポレーション

三井 E&S システム技研株式会社

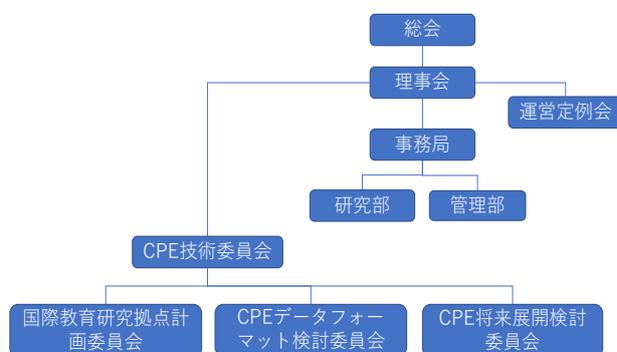


図 1-2-1 サイバー・フィジカル・エンジニアリング技術研究組合の組織体制

委員会として、下記 3 委員会を委託事業のもと、設立した。

国際教育研究拠点計画委員会

CPE データフォーマット検討委員会

CPE 将来展開検討委員会

1-3 成果概要

CPE デジタルツイン構築のゴールとして X 線 CT 装置をベースにした計測手法を基に情報プラットフォームを構築することを目指している。本事業は最終的なゴールに対する前段階の位置付けとして、光学スキャナーをベースとした計測手法を軸に部分的に X 線 CT 装置を組み合わせた計測によって全体の計測情報を統合するアプローチで推進している。車両の全体計測は光学スキャナーを中心とし、ボディ骨格、バッテリーは X 線 CT を中心とした計測とした。

今年度は車両入手に関して NIO EC6 及び ES8 を購入し、それぞれの調査ターゲットを個別に設定した。EC6 では車両全体のモデル構築を実施し、且つ部品毎の情報を取得して構成部品についてサプライヤー調査を含めた BOM (Bill of Material) 整理に着手した。今年度の作業は、車両分解、形状計測を中心とし、BOM 構造についても一部検討した。一方 ES8 は走行時の動力性能の計測を行い、実車からコンポーネント性能をモデル化し、これを基にしたエネルギーマネジメントモデルを作成した。

またこれらに加えて CAE 推進手法の検討として、業界で先行するドイツ Tecosim 社から実物由来のリバー CAD データ (STL フォーマット) を購入し、BOM 分析及びこれによる計算を CPE にて実行し、彼らのリバーエンジニアリング事業としてのモデル管理手法の分析とモデル化手法・計算手法の確認を行い、我々が NIO EC6 にて計画する CAD データ作成及び CAE 項目のガイドライン作成に役立てた。今年度は 3 年計画の初年度であり、この結果を来年度以降に継続するため、途中経過の形での報告とする。

第2章 本論

2-1 製品の計測、材料・回路・半導体分析、データ化

2-1-1 X線CT及び光学系スキャナーなどによる製品の構造・電気配線等非構造部品の配置の計測

(1) 車両仕様確認

現在の中国における電気自動車の技術進化は著しく、特に上海蔚来汽車 (NIO) においては、中国国外にその市場を拡げ始めている。本調査事業では、2017年に発売のES8と2019年発売のEC6を対象とした調査を行なうこととし、上記モデル2種を各1台購入した(図2-1-1-1)。

車両確認では、モータールーム内の配置や自動運転の機能、コネクティッドなどのデバイスを調査した。大型ディスプレイに搭載された機能として、カーナビゲーションの操作はもとより、エアサスペンションの車高調節やモーターの出力調整、回生ブレーキの調整といった車両の管理、ドライブレコーダーの設定やユーザーマニュアルまで集中管理されている。また、リフトを用いて下周りの部品配置や材質、形状の確認を行なった。実際に車両を見たところ、車体からシャシーに至るまでほぼアルミ素材を使用し、アルミダイキャスト部品も贅沢なまでに配置されている。部品間の締結においても、機械結合とともに接着材が多用されているところに欧州のメガサプライヤーの支援が見て取れた。

定量的な車両性能を把握するため、重心高や慣性モーメントの測定を実施した。結果としては四輪の重量バランスが均等に取れ、最も理想的とされる前後、左右比がほぼ50:50であった。

実際に実車からも欧州ハイエンド車両と同様なものが見て取れ、加速性能や足回りの制御も高級車然としており、米国テスラの対抗馬(テスラキラー)と言われている理由も納得できる。

(2) 車両分解と3D計測、CADデータ化

NIO EC6に対しては、外形の3D計測、車両分解を行い、各部品の計測と主な部品に対してのデータ化を行うこととしている。令和4年度に、CAEによる衝突性能とEMC (Electromagnetic Compatibility) の検証の実施を予定している。それらに使用するデータを取得し、ポリゴンデータを作成することを目



図2-1-1-1 中国電気自動車



図2-1-1-2 外装塗装

的に光学 3D スキャナーでの計測を実施した。

1) 外形の 3D 計測

自動車の外板には塗装された金属素材や加飾のためのメッキ部品、ウィンドウのガラスやヘッドライト、リヤコンビランプなどの透過レンズなどは、光学スキャナーでの計測にとって悪条件となるため、車体を艶消しの単一色に塗装した（図 2-1-1-2）。

今年度の計測は、以下①から④を実施した（図 2-1-1-3）。

- ①完成車状態でのエクステリアの形状計測
- ②アンダーカバーを外して足回り部品の形状計測
- ③ボンネット内部のフロントモーター内形状計測
- ④完成車状態でのインテリアの形状計測

単品計測時の位置合わせに留意し 3D スキャナーによる形状データを取得し、その後ポリゴンデータの作成を行った。エクステリアでは蓋物部品やガラス、ライト等のコンポーネント単位での部品分け、インテリアでは単体で形状計測を実施したフロントシートやドア、テールゲートの車内面などを実車の位置に合わせ、マスターモデルを作成した（図 2-1-1-4）。

令和 4 年度上期にコンポーネント単位から単品部品への分解と計測を実施し、1 台のポリゴンデータ化を実施する予定である。

2) 車両分解

今年度実施する駆動用バッテリーの X 線 CT 計測のため、バッテリーの離脱から着手した。合計 8 点の締結ボルトを外し、台車に搭載。バッテリー単体の重量を合わせて計測した（図 2-1-1-5）。

また、車両のホワイトボディ（骨格構造）化を実施した。

- ①フロント、リアモーターアッシーの離脱
- ②モータールーム内の構成部品の離脱



図 2-1-1-3 光学スキャナー計測

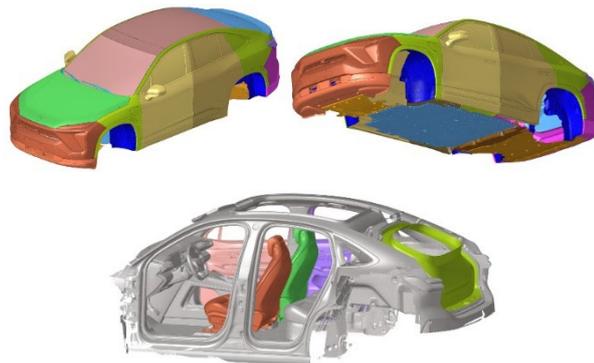


図 2-1-1-4 外装/内装マスターモデル



図 2-1-1-5 駆動用バッテリー離脱と重量計測

③内装部品の離脱

④すべての構成部品の離脱を実施（図 2-1-1-6）

但し、令和 4 年度早々にホワイトボディの剛性測定を実施し、ガラス有無での剛性差を検証するため、フロント及びルーフのガラスは外していない。



図 2-1-1-6 ホワイトボディ化（ガラス未離脱）

（3） 分解された部品等の X 線 CT 計測、データ化

EV 車両のリバースエンジニアリングとして、産業用 X 線 CT 装置を使って主要な部品の内部構成、形状確認を行った。計測対象とする部品としては、リチウムイオンバッテリーを想定した。ドアパネルなどでの接着剤の多用等がこれに該当する。そこで、ドアパネルの内部構造が X 線 CT 解析でどの程度解析が可能かの確認を行うことを追加した。

1) リチウムイオンバッテリーの内部構造の撮像

X 線 CT 計測を実施するため、バッテリー本体（図 2-1-1-5）を EV 車両から取り出し、CT 装置内に固定して撮像を行う必要がある。バッテリー自体が、大型で 500kg 以上の重量があることから、大型構造物の X 線撮像が可能な X 線 CT 装置を利用した。撮像では回転テーブル上にバッテリー立てた状態で固定し、透過撮像による内部構成解析、またバッテリーを回転させながら CT 撮像を行い 3D データの取得を行った。

バッテリーの内部構成は、一般にはセルと呼ばれる一つ一つの電池から形成される。今回の透過像撮影の結果の一例を図 2-1-1-7 に示す。内部がセルと思われる形状に分轄されていることが観察できた。また、形状確認のため、X 線 CT 像を行った一例を図 2-1-1-8 に示す。

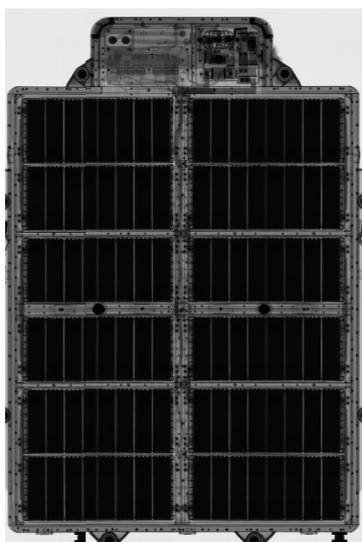


図 2-1-1-7 バッテリーユニット全体透過像

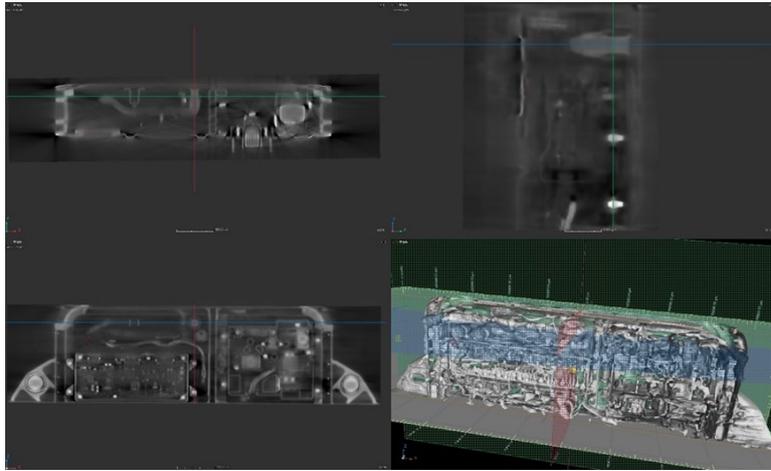


図 2-1-1-8 コントロールユニット部 CT 像

今後、リチウムイオンバッテリーの X 線内部観察、CT 撮像での形状確認として、バッテリーをセルレベルに分解後の内部キーパーツの CT 撮像、データ化を行う予定である。

2) ドアパネルの X 線 CT 撮像の検討

欧州サプライヤーのノウハウがドアパネルに生かされていることは前述したが、非破壊で CT 撮像し内部形状をどの程度確認することができるかの検討を行った。今回は国内自動車メーカーより実車のドアパネル部分を借用しニコン X 線 CT 装置での試し撮りを実施した (図 2-1-1-9)。

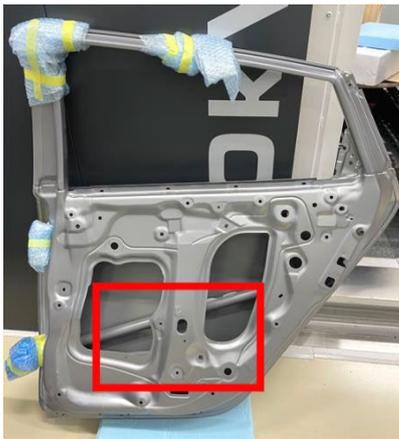


図 2-1-1-9 ドアパネル解析箇所

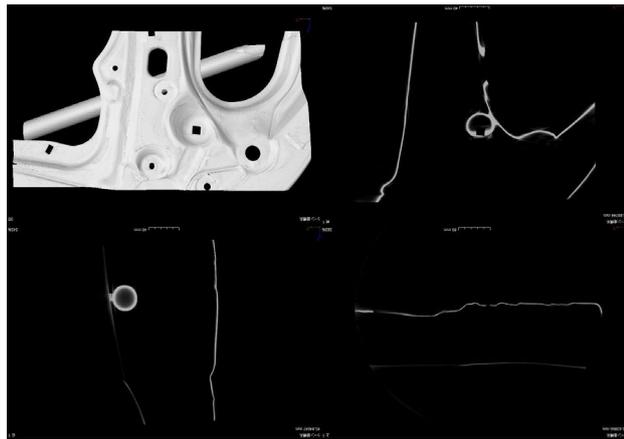


図 2-1-1-10 ドアパネル CT 像

取得した CT 像を図 2-1-1-10 に、左上の立体像と 3 方向からの透過像を示す。内部構成が確認できている。今回の試し撮りを行ったドアパネルは鉄材を多く含む構成となっている。

この状態で内部構成が確認できており、令和4年度の計測に基本的な見通しが立ったと考える。

令和4年度は、ドアパネル解析に関して、中国電気自動車の実車ドアパーツでのX線CT解析を行う予定である。

2-1-2 製品の分解による個別部品の材料分析（機械特性、物性計測）・半導体の分析、非分解での回路の特性計測

(1) 車両分解から得られた個別部品の材料分析

自動車のリバースエンジニアリング(R/E)における大きな課題として材料分析が挙げられる。素材を判断するのは、金属素材であれば磁石を近づけることで鉄鋼材かアルミ材かを判断できる。その中で、アルミの部品の一部や樹脂素材の部品には材料が刻印されている場合がある（図 2-1-2-1）。

弾性域内の CAE を実施する場合、金属素材や一般的な樹脂材であれば、まずは素材が何であるかを確認することでシミュレーションの実施は可能である。しかしながら、破壊を伴うシミュレーションを行う場合は非線形性を考慮した材料データが必要であり、且つ衝突やプレス成型といった動的負荷のシミュレーションを行う場合、一般的に金属材料では速度が増加すると強度は上昇するという特性により、材料の歪み速度依存性を考慮した材料物性データが必要になる。しかし、歪み速度依存性を考慮した材料データの取得には、高ひずみ速度引張試験を行う必要があり、実車部品からテストピースを作成し、必要に応じた速度での物理試験を行わなければならない。これを全部品で実施するのは非常に高コストとなる。

本取り組みでは、金属素材の硬度から材料を推定し同等素材でのシミュレーションを行う。今年度は計測のトライアルとして、リアサブフレームの角材を計測した（図 2-1-2-2）。

結果として、3回の硬度測定から一般的に足回り部品に使用される Al-Mg 系（5000 番台）の材料から A5086-H34 相当と推定した（図 2-1-2-3）。

令和 4 年度も基本的には硬度測定から材料を推定し、シミュレーション用材料データを作成していく。



図 2-1-2-1 アルミ部品の材料刻印例

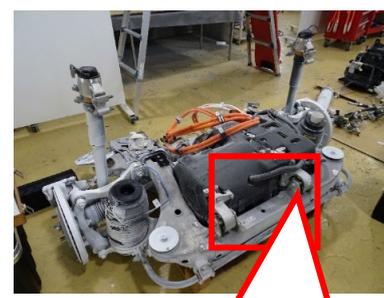


図 2-1-2-3 計測部品

		1回目	2回目	3回目	
計測値		96	93	95	
材質記号	質別	引張強さ	耐力	硬さ	比重
A5056	H34	299	230	95	2.64
	H112	245	98	75	2.64



図 2-1-2-2 計測結果と材料推定

(2) 半導体非破壊検査とサプライヤー調査

NIO ES8 に搭載されている約 30 個に及ぶ制御ユニット群の中でも車両全体の主要エネルギー（駆動エネルギー、冷却・熱エネルギー）をマネジメントしている VCU (Vehicle Control Unit) に着目して分解調査を行った。製品自体はケースに貼付されているラベルから UAES 社であることが判明し、Bosch 社の技術が多く投入されていることが推察される。VCU ケースからコネクタ、基板、搭載半導体チップ、チップ内部構造に至る分解調査を行い、中国製 EV 用 VCU の設計・生産・技術レベルを考察した。今回、内部分解調査を行って判明した特徴点として、下記のことが判明した。

- ①先進的な放熱ジェルを採用（国産比）
- ②欧州系半導体が中心（米国製は極少数）
- ③カスタム IC の採用なし（半導体不足の影響小）
- ④VCU として日米欧と同等で国際競争力あり

1) 分解結果のまとめ

NIO ES8 の VCU は欧州系半導体メーカーの車載用半導体を中心に構成されている。米国製半導体はほとんど採用されていないという特徴がある。中国製半導体は使われていない。今後は CAN (Controller Area Network) やパワー半導体などが中国製に置き換わるものと推測される。欧州半導体メーカーの INFINEON 社、STMICRO 社、NXP 社などは実績の大きい汎用チップを中国に多数供給している。NIO ES8 の VCU は、在庫も多い汎用チップを中心に構成されており、半導体不足の影響を受けにくいものになっている（すなわちカスタム IC の利用がない）。

補足として 1 世代前の中国 CHERY の VCU でも欧州半導体を中心に構成されており、中国と欧州半導体メーカーは商取引の歴史も長いことから今後も欧州製半導体を中心に車載 VCU が構成されるものと思われる。

2) NIO VCU 技術の日米欧比較

NIO ES8 の VCU は、日米欧の VCU と比較して過剰も不足もないほぼ同等の構成となっている。現在中国では非常に多くの VCU が作られており、ノウハウも十分に蓄積されているものと思われる。放熱に関しては放熱ジェルなどを使うことで日本メーカーよりも先進性がある。DJI 社のドローンなどで使われているジェルとほぼ同等のものが NIO ES8 に使われている。信頼性や品質、防塵性などに関しても日米欧と同等と見られる。NIO の VCU の技術水準は十分に国際競争力を持つものと判断する

2-1-3 CAE (Computer-Aided Engineering) のためのデータベース管理手法の検討

1) 導入計画及び実績

半導体不足の影響から各種システム機器類の選定及び調達が遅延して、データ管理環境構築における計画詳細を詰めるのに時間を要した。そのため、委託事業遂行に必要な計算用HPCサーバーはレンタル機で開始することとなった。また本格稼働においてセキュリティの観点から専用データセンターにシステムを設置することとしたが、コロナ禍においてはネットワーク業者（回線事業者/インターネットサービスプロバイダ）の現地調査の調整にも時間を要した結果、運用開始が令和4年3月25日となることを余儀なくされた。但し、サーバーは3月初旬に納品されており、データセンターへの設置前に各種設定を完了させておくものとする。

2) データセンター概要

データセンターの概要を下記に示す。

立地：東京都渋谷区

防災設備（地震対策）：免震構造建築、シミュレーションによる免振性能692mm以内

ハザードマップ（地震防災）：建築被害危険度2、全壊個数割合5%未満の地域に立地

ハザードマップ（洪水）：浸水リスク50cm未満の地域に立地

電源設備：非常用発電機（4000KVA）、重油備蓄20000L、UPS 300KVA×4台+1

空調設備：空冷式パッケージ空調、集中温湿度管理

セキュリティ：防犯カメラ、人感センサ、生体照合、カード認証、24時間監視体制等

3) 導入するセキュリティ及びアクセスシステム

・セキュアゲートウェイ/ファイアウォール

ファイアウォール、プロキシ、ウイルスチェックなどの包括的な仕組みを持ち、拠点間との安全な接続を提供する。

・Virtual Private Network (VPN)

インターネット上に仮想的な専用回線を敷き、セキュリティ上の安全な経路を使って拠点への暗号化通信を行う。

・サーバーへのアクセスログ解析ツール

ユーザーの行動記録をサーバーから効率的に取得し、セキュリティ上の有事の際の追跡を可能にする。また、ユーザーの行動特性分析が可能。

・サイバーセキュリティ パック

専門業者によるAIによる最新テクノロジーと人による遠隔監視するサービス。

システム本格稼働後の来期以降に、様々な拠点（企業、大学、官公庁、リモートワーク）

から接続する状況のなかで、計算環境の最適化及び研究者の作業効率性とセキュリティ確保を両立し得るデータ管理を実行し、評価を行っていく。

2-2 CAEモデル化、シミュレーション

2-2-1 Dデータ化、CAEモデル化による衝突、EMC (Electromagnetic Compatibility)、エネルギーマネージメント等各シミュレーションの実施と検証

(1) CAEモデルによる衝突解析

今回の事業でTecosim社作成のVolkswagen Golf7モデルを購入し、その内容の解析とモデルを用いた衝突解析を行った。

1) Tecosim社の解析モデル

①衝突解析モデル概要

下記の6種類の衝突解析用モデルデータが提供されている。

ルーフ強度試験モデル

前面衝突 (56km/h・対剛体壁 フルラップ) 試験モデル

ポール側面衝突 (32km/h・75° 衝突) 試験モデル

後面衝突 (48km/h・対剛体壁 フルラップ) 試験モデル

前面衝突 (15km/h・対剛体壁 10° & 40% Offset) 試験モデル

後面衝突 (15km/h・対剛体壁 10° & 40% Offset) 試験モデル

②衝突解析用モデルデータ構成

モデルファイルは、図 2-2-1-1 に示すように分割ファイルで構成されている。衝突解析モデル毎に、メインファイルが必要な分割 (インクルード) ファイルを呼び出して使用する。

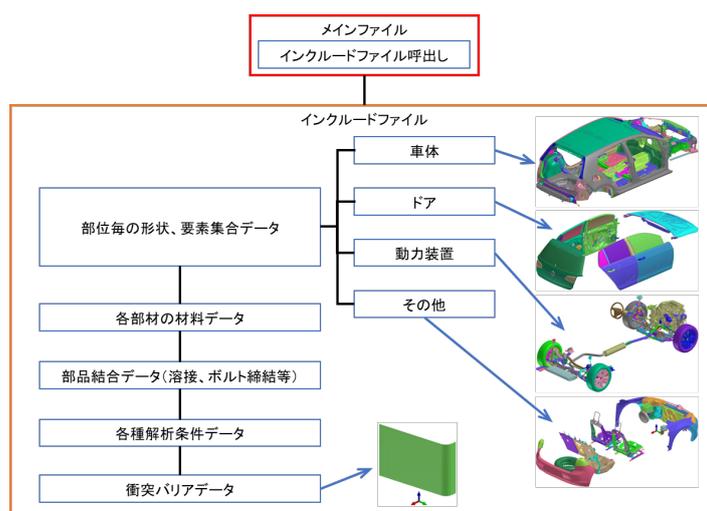


図 2-2-1-1 衝突解析用モデルファイル構成

③解析結果レポート

入手した解析結果は下記の試験についてのレポートとなっており、デジタルデータは存在しなかった。

前面衝突 (64km/h・対バリア 40% Offset) 試験

NVH 車体試験

ポール側面衝突 (32km/h・75° 衝突) 試験

ルーフ強度試験

側面衝突 (50km/h・対バリア) 試験—Euro NCAP 規格

側面衝突 (50km/h・対バリア) 試験—IIHS 規格

前面衝突 (64km/h・対剛体壁 25% Offset) 試験

2) 衝突解析結果

Tecosim社より入手した衝突解析はLS-Dynaを用いており、そのモデルを本事業ではPAM-CRASHモデルへ変換し解析した。代表的な衝突形態である前面衝突の解析結果を図2-2-1-2に示す。

前面オフセット衝突のモデルとなっており、衝突速度は64km/hとしている。

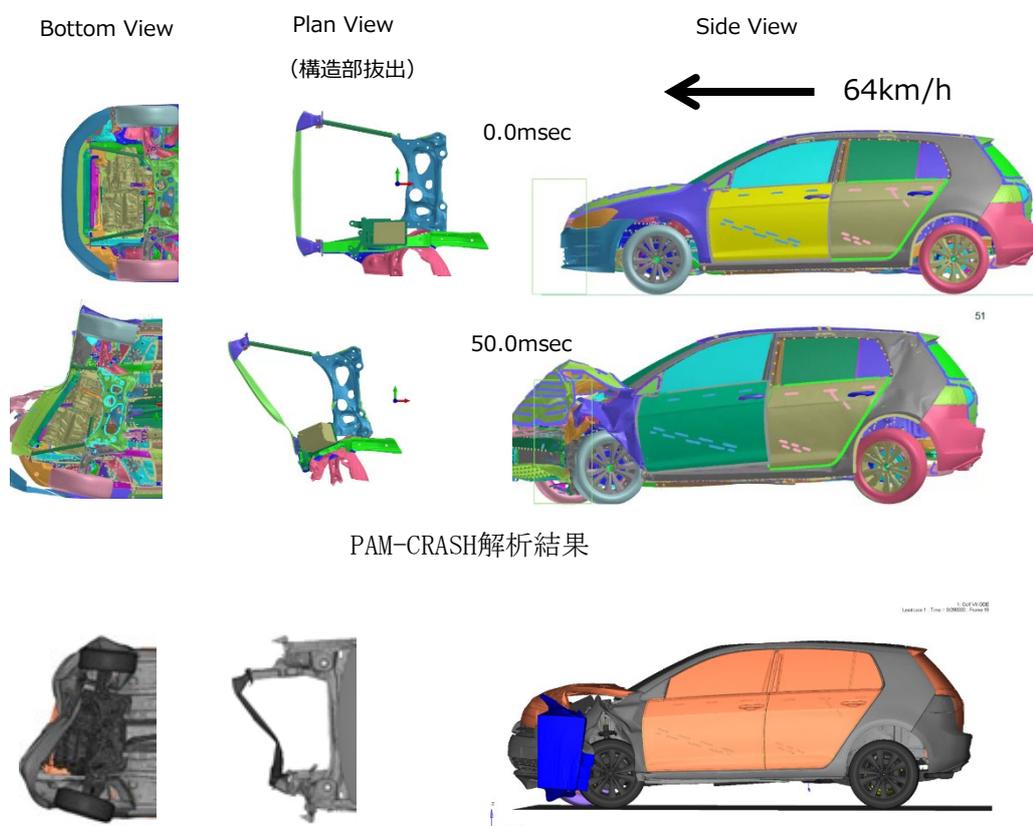


図2-2-1-2 Tecosim社より入手したモデルを用いたPAM-CRASHとLS-Dynaの解析結果の比較

解析結果から変形が最も激しいフロント部の変形形状は、両方共に同じ傾向を示すことを確認できた。このことから本事業で作成したPAM-CRASH用解析モデルは、適切な解析条件が設定されていると判断できる。この他側面衝突においても同様の結果となった。

(2) CAEモデルによるEMC解析

電磁両立性(電磁妨害源とならないこと、電磁干渉に対する耐性があること)を検討できるEMC解析を行った。そのため、Tecsim社より入手した衝突解析モデルをベースにEMC解析モデルを作成した。EMC解析モデルは、解析は、衝突解析と比べて非常に計算機負荷の大きいため、「不要部材除去」「段差や穴の簡易化」「形状の簡易化」を実施し、Golf 7の衝突解析モデルが持つボディパネルモデルに対して、図2-2-1-3に示すようなリダクション(簡易化)を行い解析した。

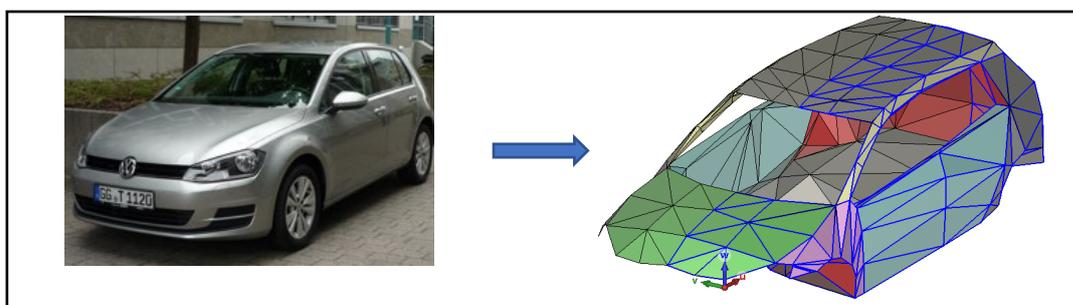


図2-2-1-3 EMC解析形状リダクション

この解析モデルを用いて、今年度は下記のEMC解析を行った。

- ①ガラスアンテナパターン特性解析 (S-parameter, E-field)
- ②WH特性解析
- ③車両EMC解析
- ④EMC連成解析

①ガラスアンテナパターン特性解析 (S-parameter, E-field) (図 2-2-1-4)

平面ガラスアンテナ案1はS-parameterを解析し、76~109MHzで良好な S_{11} (反射特性)が得られた。また、共振が大きい76.5/92/101MHzにおけるE-field及び指向特性を解析し、共振点によって電界変化に違いが見られること、指向特性にヌル点(受信感度が大きく低下する角度)があることを示した。

平面ガラスアンテナ案2はANT1及びANT2についてS-parameter解析を実施し、90~109MHzで良好な S_{11} または S_{22} (反射特性)だったので、これを立体ガラスアンテナモデルにして再度S-parameter解析を実施し、同様の特性を得た。

- B) WH に信号を印加した時、WH 近傍の車体表面に電磁誘導されていること、またループなどの WH から離れた部位にも電磁誘導が見られることが分かった。よって、WH から放射される電磁波は、直接アンテナに伝搬されるものと車体に誘導された後、前記①の推定によって間接的に伝搬されるものがあると推定される。
- C) $\lambda/2$ 共振モードにおいて、WH の信号印加時、DUT 側から印加する場合に比べ終端側から印加した方が ANT への誘導がより大きい傾向があった。よって、ノイズ源がアンテナに近い方がノイズを受信するリスクが高いことが推定できる。
- D) 全体を通して、WH-A の 90.2MHz $3\lambda/4$ 共振モードの電界分布が他の分布に比べ約 40 倍大きいことが分かった。よって、この解析モデルでは、WH をフロアトンネルに並走後、リアフェンダ方向に配策すると EMC 問題となるリスクが非常に高いと推定される。

④EMC 連成解析

車載電装機器のスイッチングによって発生するノイズのパターンを擬似的に生成するツールを作成した。本ツールは任意の 90・96・100MHz の狭帯域ノイズ及び雑音ノイズを含む擬似信号(Excitation Signal(90, 96, 100M+Random))を生成できるものである。

車両 EMC 解析モデルの S-parameter を用いて EMC 連成解析モデルを作成して、WH-A(DUT)に擬似ノイズ信号を印加した際の ANT1 及び ANT2 に誘導されるスペクトルを導出した。結果として、WH に印加されたノイズスペクトルが ANT に誘導される電圧は 0.1%以下と微弱だが、ノイズスペクトルが観察されることを確認した。

以上より、衝突解析モデルを利用した電磁界シミュレータ用の車両 3D モデル構築、電磁界解析、EMC 解析に関する検証プロセスを実施し、解析手法に関する知見が得られた。

(3) 車両分解測定データフォーマットや衝突解析モデリングの検討

1) 車両分解測定データフォーマット検討

形状については、車両構造部材及びユニット部品類を中心に測定が行われており、大きな問題なく測定を実施中である。衝突解析モデルでは測定された車両形状データに基づいて、有限要素を用いた形状表現を行う。但し、接合された部品を切り離した際、接着剤で接合されている部品や溶接されている部品については、切り離し後に応力解放されることから、分離後の測定データは参考値とし、アセンブリ状態のデータを正とする。

2) 材料物性モデリングと測定データ

衝突解析では、PAM-CRASHを用いた解析モデリングにて必要となる材料データを検討した。主なデータは密度や弾性係数、塑性領域の特性である。特に塑性領域の応力-ひずみ特性は変形モードなどへ強い影響を与えるので詳細な材料物性測定が求められる。

物性測定について、すべての部品から試験片を作成し、動的破壊試験機により引張試験を行うのが理想的であるが、試験片を確保できる部品は限られるのが課題となる。そのため、非破壊かつ微小領域で測定可能な「硬さ試験」により材料を推定して、当該材料の引張試験データを入力することで、衝突解析用データを構築することとした。

また、モデリング対象となる車両はアルミの押し出し部材を多用しており、今回の対象となった車両（G1of7）と異なる。したがって、車両測定データを元に詳細なモデリングの方法を検討する。

3) 部品接合モデリング

部品接合はアークやスポット等の溶接工法、ボルトなどを用いた剛体締結、接着剤を用いた結合工法が対象となりうる。溶接やボルト等の接合は今回作成した車両モデル（PAM-CRASH）のモデリング方法に準じて実施する。接着剤による接合のモデリング方法について、実車の接合状態とPAM-CRASHで利用できる解析条件を整合するチェック指針を策定している。

(4) 車両の回路図、エネルギーマネージメントモデル作成

NIO ES8 の性能計測分析と電費モデル構築のため、シャシーダイナモ試験（図 2-2-1-5）を実施し、電費性能に関わる電気、熱（冷却水温度）、動力系の各エネルギー変換ポイントについて、各種モード走行時の物理特性を計測した。また、計測データの分析により、電費性能



図 2-2-1-5 シャシーダイナモ試験（早稲田大学本庄キャンパス研究棟）

他の特性グラフ化とそれらを机上再現し、さらに試験を実施していない走行モードの性能も予測可能なモデルを構築した。

1) 自動車システムアーキテククトの見える化

ES8 車両に搭載されている各種機能を実現している具体的なシステムアーキテクチャーを調査した。まず今回の計測調査によって明らかにすべきシステムアーキテククトとなるバッテリー電力から車輪駆動力に至る電力⇒駆動力の動力伝達系エネルギーマネージメントについては図 2-2-1-6 に示すようなアーキテクチャであることが判明した。

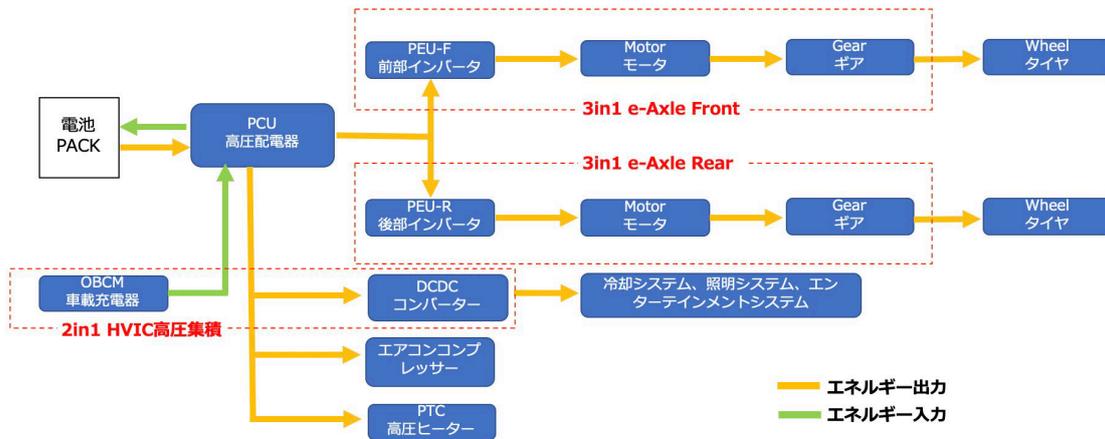


図 2-2-1-6 動力伝達系エネルギーフロー図

ここでわかることは、Front Rear 共にインバーター・モーター・減速ギアを一体化した 3in1 の e-Axle を採用することでシンプルな伝達系を構成していることである。これがエネルギー効率にどれだけ効果をもたらしているかを性能分析で明らかにしていく。

次に、この電力・動力伝達系で発生するエネルギーロス⇌熱発生による温度上昇を抑制す

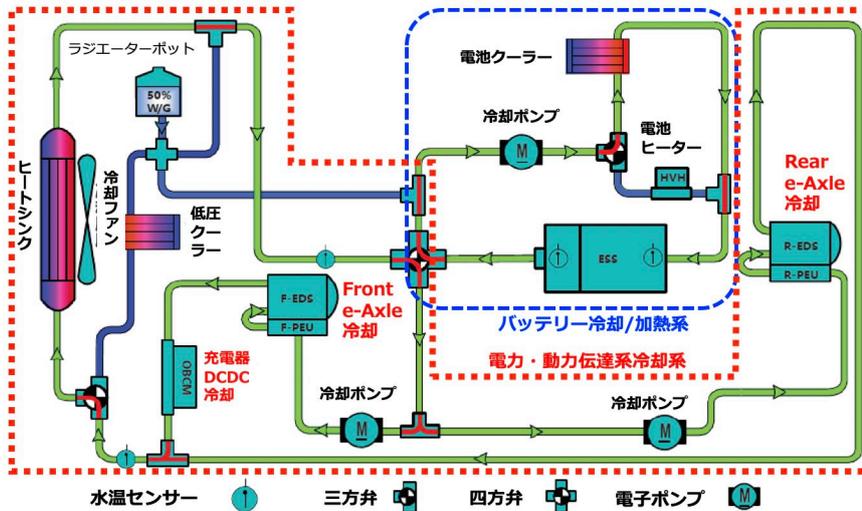


図 2-2-1-7 冷却系回路図

ら制御ユニット内でも実消費電力から電池残量を推定しているものと思われる

- ② 欧米中で使用される超高速走行を含む WLTC モードでの電費は 4.7km/h であり、同モード電費が約 7km/kWh の日産 NOTE e-POWER (SHEV の電駆性能のみで比較) に比べるとかなり低い、車両サイズ (空気抵抗) と車重 (転がり抵抗、慣性抵抗) の差によるものが大きい為エネルギー効率で比較する必要がある
- ③ 航続距離は約 300km と公称値 (580km) の約半分であるが、公称値の前提不明であり考察できない
- ④ インパネ残量表示 0% となった時の実残量 (従来のリザーブタンク容量に相当) は 5kWh 程度と推測され、速度制限付きで 20km 以上の走行余力を確保している

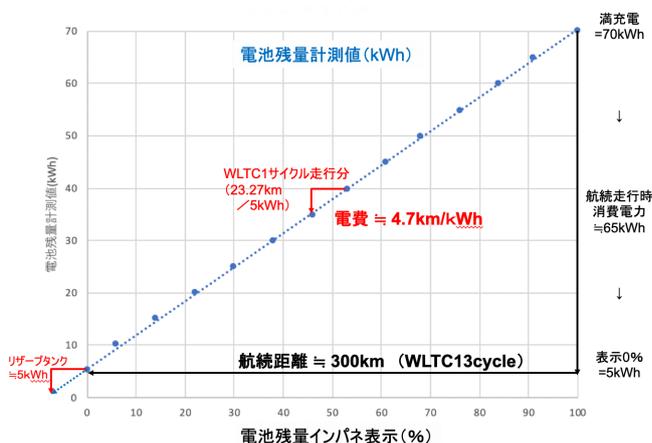


図 2-2-1-9 バッテリー特性と電費性能

4) 電力/動力伝達系エネルギー効率

定速運転状態での配電器及び前後 e-Axle の入出力エネルギー特性からエネルギー効率特性を算出した (図 2-2-1-10~12)。配電器と各 e-Axle の効率を乗算することで全体の効率が求まるが、最大でも約 90%程度 (但し、アクセル開度は 50~60%以下の範囲)。NOTE e-POWER の同領域の効率も 90%前後にあった為、効率での大きな差は無く単に車両サイズ・重量による走行抵抗の増大が電費・航続距離の性能を低下させていると判断する。

5) 性能特性分析 (WLTC モード走行特性)

WLTC モード走行中の電力・駆動力特性に何か特徴が無いかを計測データより分析し下記特徴点を把握した (図 2-2-1-13)。

- ① 前後駆動力比率は超高速走行 (130km/h 超) までほぼ 1 対 1 の特性である
- ② 但し詳細に見ると 55~90km/h 帯が 1 対 1 に対し、それ以下の車速では 10%程度 Rear 駆動が大きくそれ以上の高車速では 5%程度 Front 駆動が大きい (加減速時の荷重移動に対応すると想定していたが車速応動となっている模様)
- ③ ブレーキ回生時は前荷重になるのに合わせてフロント回生力を高めていると推察

バッテリーからe-Axleへの電力配電 (PCU) 効率

		車速						
		0	10	20	40	60	80	100
アクセル開度	0	0	0	85.62092	93.82022	89.47368	97.51553	98.1203
	10	72.3	65	85.52632	93.53933	82.85714	97.51553	98.1203
	20	90	98.2	98.4	98.5	98	97.4	97.5
	30	95.85	98.9	99.25	99.5	99.6	99.6	99.56
	40	96.22	99.3	99.5	99.67	99.74	99.76	99.75
	50	97.3	99.46	99.6	99.75	99.8	99.82	99.78
	60					99.85	99.78	99.78

図 2-2-1-10 エネルギー効率マップ (配電器)

Front e-Axle効率

		車速						
		0	10	20	40	60	80	100
アクセル開度	0	0	86.53846	83.68794	80	0	77.24138	78.28571
	10	0	33.33333	81.37931	76	0	75.9322	74.05405
	20	20.63492	80.4	85.3	83.03	75	43.5	47.5
	30	21.05263	77.5	85	88.7	90	89	88
	40	1.6	74	85	89.5	91.1	91.5	92.5
	50	6.896552	73.5	84	88.5	91.4	92	94
	60					90	92	93

図 2-2-1-11 エネルギー効率マップ (Front e-Axle)

Rear e-Axle効率

		車速						
		0	10	20	40	60	80	100
アクセル開度	0	0	0	23.33333	50	0	55.23077	64.75
	10	0.01	1.8	25	48.84615	0	53.58209	63.17073
	20	0.69	64.3	70	72	58.5	32	31.5
	30	0.96	66.7	78.2	82.18	81.8	82.2	79
	40	0.7	69	78.5	84.5	85.6	86	86.35
	50	1.25	65	77	84	87	88.3	88
	60					85.5	88.2	88.8

図 2-2-1-12 エネルギー効率マップ (Rear e-Axle)

④ 但しノーブレーキ回生時は前後 1 対 1 で荷重との相関は無さそう

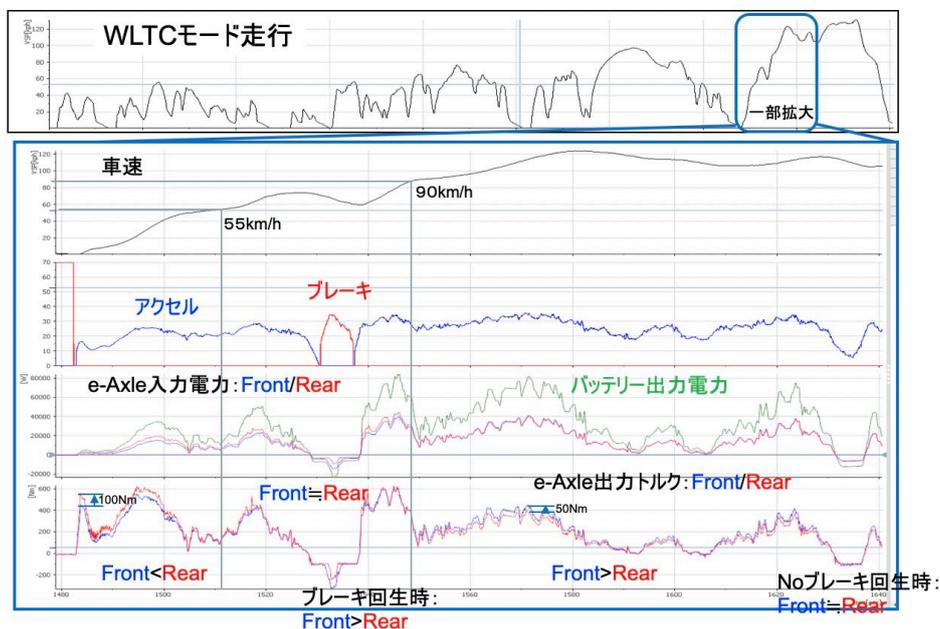


図 2-2-1-13 WLTC モードにおける電力・駆動力特性

6) モデル構築 (走行特性再現～性能予測)

計測データを基に性能を机上で再現できる 1D リダクションモデルを作成した。図 2-2-1-14 に示しているのは、MATLAB Simulink で作成した車両プラントモデルの最上位階層で、四角形で示す各ブロック (入出力エネルギー計測単位に相当) が各部品・ユニットに対応する。

各ブロックの中身は、主に定常特性 (定常運転時の入出力の関係をマップ特性で表現) と伝達特性 (過渡運転時の入出力時間応答を遅延時間と一次遅れ関数で表現) で構成すること

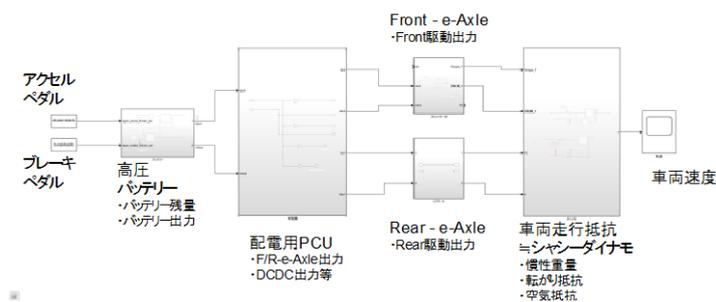


図 2-2-1-14 電力・駆動力エネルギー伝達モデル構成図

で、ほぼ試験時の車両性能を再現できることを確認した。

7) 加速性能モデル同定

主に過渡時のモデル同定を目的として 0-100km/h ハーフ加速の実計測データにモデル計算出力を適合した。バッテリー出力電力と前後インバーターへの配電電力は定常マップのみで同定した。インバーター (e-Axle) 電力入力から駆動力発生までは遅延時間 (0.2sec) と 2

次伝達関数 (Simulink TF 関数) で同定した。加速から約 1 sec 弱の駆動力波形に若干の形状差が生じているが車速挙動はほぼ再現出来ており動力性能予測への適用は可能と判断する。

8) WLTC モード走行モデル同定

加速性能モデル同定を完了したモデルにより WLTC 走行も同定完了できていることを検証し、モード走行車速や電力・駆動力特性がほぼ再現できていることが確認できた。

9) 全負荷加速走行モデル予測

シャシーダイナモ設備の制約により全負荷加速性能は計測できていなかったが、構築したモデルを活用し全負荷加速性能を予測した。最大出力は諸元データをモデルに適用することで、0-100km/h 性能の公称値 4.4sec よりも若干遅い 4.8sec を予測。これはアクセル 60%以下の特性から全開性能を予測している為リア駆動力が最大出力に到達していない為である。

Dassault 社の取り組みを我々CPE と比較した場合、データ構造の改革に着眼点を置いている意味では同じであるが、利活用としての考え方に差異があると考えます。Dassault 社はユーザーニーズの多様性を意味化することを狙っているのに対して、我々はCADデータ中心から計測データ中心のデータフローに着目しており、データ素性の多様性を意味化、体系化することを目標としています。しかしながら適用している技術そのものは同じ手法であり、Dassault 社が今後、どのような展開をするのかは継続監視が必要であると考えます。

2-3 BOM (Bills of Material) 分析

2-3-1 主要コンポーネントの BOM 分析

BOMとは、「Bill of Material」の略で、日本語では「部品表」や「部品構成表」を意味する。製品を製造する上では不可欠なもので、部品構成や材料などを把握するための基本情報である。

R/Eを実施するにあたり、対象製品を分解して、その製品の部品構成や設計思想等を分析する上で、BOMは不可欠である。特に自動車は部品点数が非常に多く、その部品一つ一つからパーツの組み上げ方に至るまで、各社の設計思想が盛り込まれている。また、自動車は、完成車メーカー（OEM）だけで製造されているものではなく、様々な部品メーカーや素材メーカーから調達して組み上げられている。R/Eでは、各部品や素材がどこのサプライヤーから調達されているのかも併せて調査することが必要である。

また、自動車と環境問題の関係は非常に高く、レシプロエンジンなどの内燃機関による化石燃料の枯渇や二酸化炭素の排出による地球温暖化への影響から、各国や自動車メーカーでも電気自動車（EV）へのシフトが加速し、中国や北米などでは新興メーカーの台頭も見られ、そのうちの一つに今回調査対象としたNIOも含まれる。

つまり、自動車関連企業や自動車エンジニアのみならず、様々な業界の人たちがEVの開発や生産に関わる時代が来ることが予想され、環境問題やCASEなど様々な角度から関連する部品検索を可能とするBOMの階層を持たせた構成も必要になる。

現時点では今後詳細を検討していくため、EXCELでの仮フォーマットを作成し、拡張性を持たせた部品表としてのBOMとしている（図2-3-1-1）。

今回、これまでの常識にとらわれないBOM構成の検討の必要性からデータプラットフォーム検討委員会を設置し、オントロジー技術を活用した新しいデータ基盤を構築していくことを目標としている。

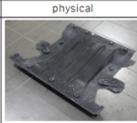
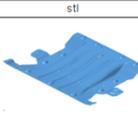
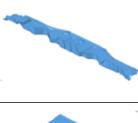
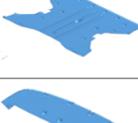
仮No.		physical	stl	material
11001	undercover, fr			不織布 Non-woven fabric
11002	undercover, rr a			不織布 Non-woven fabric
11003	undercover, rr b			不織布 Non-woven fabric
11004	undercover, rr c			不織布 Non-woven fabric

図 2-3-1-1 BOM (仮フォーマット)

2-4 本調査の目的を達成するための我が国体制の在り方の検討

2-4-1 我が国における CAE サービス提供の仕組みの検討

CPE の取り組みとして計測からモデル化を経て CAE による計算とその評価を一連のプロセスとして情報プラットフォームの確立を目指しているが、情報の連鎖を支える技術としてデータの構造化概念が重要となる。CPE ではこの計測、モデル化、CAE 利活用を結ぶプロセスを前提としたデータ構造の在り方について検討を行う。推進にあたり委員会を発足し、体制を確立した(図 2-4-1-1)。メンバーは民間会社 7 社を含む 11 団体から専門家及び有識者の委員 14 名で構成した。委員長は理化学研究所の小林紀朗氏、副委員長には三井 E&S システム技研の岡本英明氏とした。本活動を推進するにあたり、いくつかの分科会を設置し、分野ごとに活動を行える体制としている。分科会は 2 つを設置し、「データ構造化研究分科会」と「データ管理システム試験研究分科会」としており、構成メンバーはそれぞれ 10 名と 7 名とした(表 2-4-1-1)。

活動のターゲットは現物モデルデータ活用としており、本委託事業である NIO EC6 に対して、衝突、EMC の解析を設定し、先行する「車両分解と 3D 計測、CAD データ化」チームに対して、データ構造のカギとなる BOM について要件を提示した。またエネルギー管理解析についてはモデルそのものが 3D ではなく、1D となっているため、追加項目として新たな分科会設置を検討を開始した。

来年度に向けては NIO EC6 の衝突、EMC の CAE が実施されるため、これによるデータ構造及びデータ管理を適切に行う情報システムについて提案する。また今年度、追加で検討を開始したエネルギー管理解析分野についても、分科会設置を目指し、3D のみならず 1D も含んだデータ構造の在り方について検討しモノづくりを総合的に評価可能なデータ構造の提言を目指す。

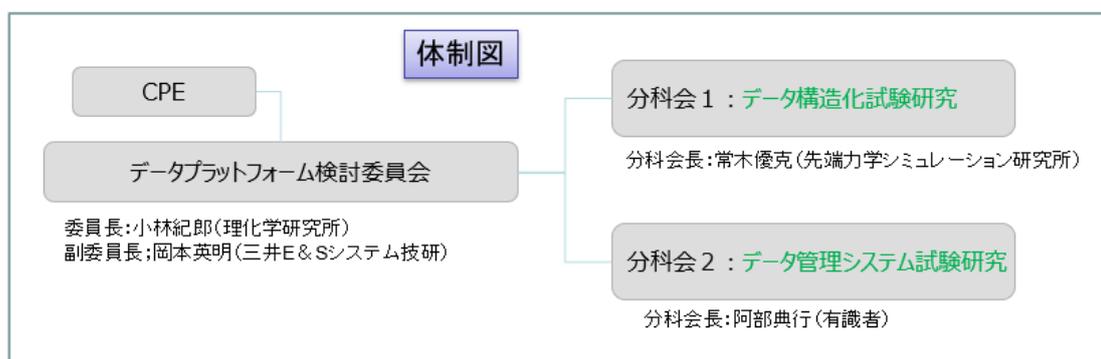


図 2-4-1-1 データプラットフォーム検討委員会体制図

表 2-4-1-1 データプラットフォーム検討委員会メンバー表

所属	氏名	委員会	分科会 1	分科会 2
株式会社アーク	阿久津 幸生	○	○	
インテグレーションテクノロジー株式会社	船田 浩良	○		
株式会社エフテック	緑川 純一	○	○	○
先端力学シミュレーション研究所	常木 優克	○	○	○
株式会社フィアロコーポレーション	松本 貞行	○	○	○
三井 E&S システム技研株式会社	岡本 英明	○	○	○
CPE 本部 顧問 (東京大学)	鈴木 宏正	○		
CPE 本部 顧問 (一般財団法人ファインセラミックスセンター)	獅山 有邦	○		
CPE 本部 常務理事	高山 光弘	○		
国立研究開発法人理化学研究所	小林 紀郎	○	○	○
株式会社エリジオン	相馬 淳人	○	○	
	中西 克嘉	○	○	
外部有識者	阿部 典行	○	○	○
	金古 章	○	○	○

2-4-2 我が国における X 線 CT を用いた CPE 体制構築可能性の検討

CPE が目指す「ものづくり情報プラットフォーム構築」の中で中核となるリバースエンジニアリング装置群として整備・拠点化の計画と運用及び体制の検討を開始した。実物から構築されるデジタルデータで様々な予測や仮想実験を可能とすることで、これまで解決が困難であった課題に取り組み、さらにはより豊かな生活を実現することを目指しているが、これを実現するためには超大型 X 線 CT 装置だけでなく、中小型 X 線 CT 装置や光学計測、材料計測、電子顕微鏡など多様な計測装置によるデータを総合的に組み合わせることが必要となる。またプロセスで見た場合にも、撮像、画像処理、モデル化、利活用に分かれており、これらをつないだ形で成立することが求められる。推進体制としては委員長に CPE 本部の高山光弘氏、副委員長には CPE の顧問でもある日立製作所の佐藤克利氏とし、取り組みについては 3 つの分科会に分けることで並行して議論を進めることを検討中である (図 2-4-2-1)。分科会 1 として超大型 X 線 CT 装置の設置の研究提案、分科会 2 として X 線 CT 画像処理基盤技術研究、分科会 3 として現物データ活用による CPE 展開である (表 2-4-2-1)。今年度は NIO EC6 による X 線 CT 現物リバースデータ及び他事例研究から X 線 CT 計測及びスキャンデータからのデータ再構築等におけるリバースエンジニアリング上の課題を抽出した。さらに大型 X 線 CT 装置の仕様案及び技術課題の抽出を行った。

令和 4 年度の予定としては種々の製品に対する大型 X 線 CT 装置及び装置群の仕様案及び検討体制の提案や、NIO EC6 の実測データ再構築による CPE 上の技術的課題及び検討体制を提案する。

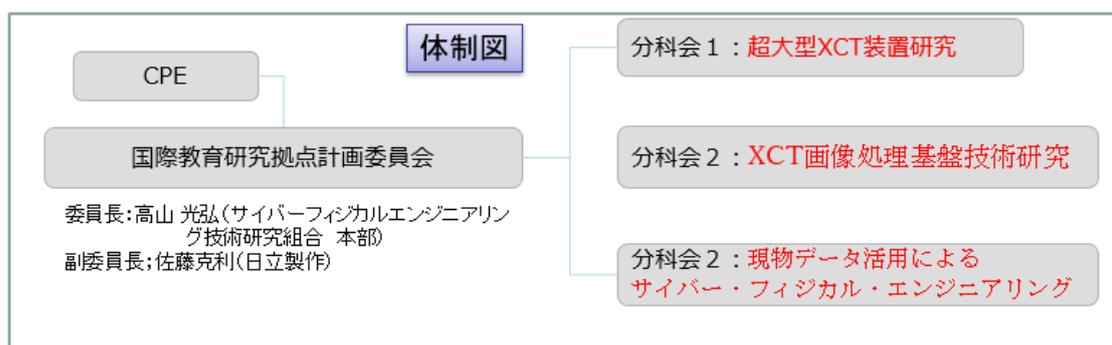


図 2-4-2-1 国際教育研究拠点計画委員会体制図

表 2-4-2-1 国際教育研究拠点計画委員会メンバー表

所属	氏名
AZAPA 株式会社	市原 純一
株式会社エフテック	緑川 純一
株式会社構造計画研究所	高根 健一
株式会社ジーテクト	鈴木 宗
先端力学シミュレーション研究所	常木 優克
株式会社ニコンソリューションズ	種村 隆
株式会社フィアロコーポレーション	松本 貞行
三井 E&S システム技研株式会社	岡本 英明
CPE 本部 顧問 (株式会社日立製作所)	佐藤 克利
CPE 本部 顧問 (東京大学)	鈴木 宏正
CPE 本部 顧問 (一般財団法人ファインセラミックスセンター)	獅山 有邦
CPE 本部 常務理事	高山 光弘

2-4-3 海外における先行事例の調査・分析

リバースエンジニアリングについて先行3社のモデルデータ分析を行った。リバースエンジニアリングによるCADデータの販売事業を推進する会社は大きく分けると、ビジネス情報とエンジニアリング情報の二つに分かれる。前者は自動車産業のマーケットやコストなどを中心とした情報サービスであり、後者は車両の機能、特性、などを中心としている。CPEは車両の機能、特性を評価可能な情報を提供するサービスを目指しており、これに該当する企業について調査を行った。調査を行った結果を表2-4-3-1に示す。

米国のCaresoft社は今回のプロジェクトのきっかけとなった取り組みであるが、これ以外に欧州でもこれに類するサービスを展開する会社が存在する。ドイツTecosim社は欧州、特にドイツの車両についてリバースエンジニアリングを展開し、作成したCAEモデルの販売を行っている。またフランスのA2Mac1社も同様なビジネスを展開している。今回は以上の3社についての比較を行うことで、今後のCPEの展開について方針を検討する材料とする。

表 2-4-3-1 海外における先行事例比較

	Caresoft	Tecosim	A2mac 1
	米国	ドイツ	フランス
データ計測方法	X線CT計測	光学計測	光学計測
		板厚計測	
CAD	STL⇒IGES	STL⇒IGES	STL⇒IGES
	肉厚データあり	肉厚データあり	表面のみ
材料データ	試験片テスト	試験片テスト	試験片テスト
機械/電気	○	△(機械のみ)	○
CAE	可能	可能	不可能
実車性能計測	○	△(衝突のみ)	○
データ化範囲	自社基準	依頼者ベース	自社基準
データ数	7	19	300台以上
評価	○	△	△

まずドイツTecosim社、フランスA2Mac1社は車両計測のベースを光学計測にしている点が米国Caresoft社と大きく違う。Tecosim社は光学計測で得られたデータで外部形状データをモデル化するとともに内部構造をデータ化するために分解過程で発生する変形を抑える工夫

をし、CAE 可能な情報を整理している。一方 A2Mac1 社はそもそも CAE 化をターゲットとしておらず、分解した部品のサプライヤー情報、素材情報などを整理するところに注力している。また今回比較した 3 社はすべて機械的特性が中心となっており、Caresoft 社は電気回路の配線情報をサポートしているが電磁波などの特性を取り扱っているサービスはなかった。さらにこれまでライブラリー化した車両のデータ数では A2Mac1 社が抜きんでており、300 台以上の実績がある。

上記のような比較から、将来的に CAE での展開に最も注力しているのは米国 Caresoft 社であり、技術的にも CPE の方針と同じベクトルである。Caresoft 社はデータ計測を推進するにあたり、インドの安い労働力を活用することでコストを抑えているが、CPE がこれに対抗するには日本の優秀なエンジニアリングを背景に AI を組み合わせることで、省人力化と高機能データベース化を目指す必要がある。これにはデータ構造の考え方が重要であり、オントロジーとの連携が重要であると考えられる。

第3章 まとめ

本年度事業は令和3年度下期からの事業開始となり、時間的な余裕がない中での計画であり、且つ昨今の半導体不足による影響で、車両入手や計算環境整備で計画変更が発生し、予算及びスケジュールを変更することとなった。特に車両入手については約1か月の遅れが発生し、また入手車両についても初期計画から変更せざるを得ない状況が発生したが、これをリカバリーし、何とか成立させることができた。来年度に向けてはドイツ Fraunhofer EZRT での X 線 CT 計測を計画しているが、ウクライナ情勢により車両の輸送に対して制約が既に発生しており、不透明な見通しの中で計画を推進することとなる。

今期は中国 EV の NIO を分解調査することにより、彼らのビジネス戦略が日本とは異質のものであり、ドイツの技術を活用した取り組みにより、他領域の技術活用など日本の自動車産業よりも先んじた取り組みを行っていることが分かった。具体的にはボディおよびシャシーの骨格はアルミフレームを採用しており、さらに接合についても接着剤が多用されている。これは日本の自動車メーカーでは見られない構造であり、これを実現するには生産ラインそのものを刷新する必要がある。この構造は2019年に市場に投入された ES8 も同構造である。2022年現在、SDGs でリサイクルの考え方としてアルミの採用が注目されているが、これに先んじて NIO の車両はアルミ骨格構造を基本プラットフォームとして複数車種に展開していることが分かった。令和4年度は実際に CAE による計算を実行し、NIO の性能を明らかにする。さらに、この性能分析結果を組合企業及び外部からフィードバック情報を活用して、よりよい計測手法、モデル化手法へのスパイラルアップができる体制づくりを進める。これを基に光学スキャンから X 線 CT に展開する課題について検討し、ゴールに向けての展開に繋げたい。

二次利用未承諾リスト

報告書の題名 令和3年度 重要技術
管理体制強化事業
我が国におけるX線CTを用いたCPE体制
構築可能性調査 調査報告書（公開
版）

委託事業名 令和3年度重要技術管理
体制強化事業（我が国におけるX線CTを
用いたCPE体制構築可能性調査）

受注事業者名 サイバー・フィジカ
ル・エンジニアリング技術研究組合

頁	図表番号	タイトル
18	図2-2-1-1	衝突解析用モデルファイル構成
19	図2-2-1-2	Tecosim社より入手したモデルを用いたPAM-CRASH とLS-Dynaの解析結果の比較