

令和2年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「力学シミュレーション・計測およびAIによる  
圧壊試験時の内部状態可視化システムの開発」

研究開発成果等報告書（抜粋）

令和5年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 株式会社先端力学シミュレーション研究所

## 目 次

### 第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制

### 第2章 本論

- 2-1 バッテリーパックの圧壊試験条件の最適化手法の開発
  - 2-1-1 圧壊試験シミュレーションの基本モデリング技術の開発
  - 2-1-2 圧壊試験シミュレーションによる不確かさ評価技術の開発
  - 2-1-3 圧壊試験シミュレーションによる最適化技術の開発
- 2-2 バッテリーパックの圧壊過程の可視化技術の開発
  - 2-2-1 圧壊試験計測技術の開発
  - 2-2-2 AI を活用した内部損傷状態予測技術の開発
  - 2-2-3 オープンソース FEM コード FrontlSTR を用いた圧壊試験シミュレーション技術の開発
  - 2-2-4 内部状態可視化システムの実機相当形状サンプルによる検証

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

EV/HEVなどの電動自動車において、搭載された駆動用バッテリーの性能は自動車の動力性能や航続距離を決める最重要因子といっても過言ではない。近年普及しているリチウムイオン電池は、エネルギー密度が高くメモリー効果が無いなどの電氣的に優れた特性を持つが、一方で、内部回路の短絡等による熱暴走によって発火・爆発が生じる危険性を有している。したがって、リチウムイオン電池を自動車に搭載する際には、頑丈なケースに格納され、車両事故時の衝撃から保護される。ケースの内部には、電池セル/モジュールと共に、電池容量や内部温度の管理、安全回路などの機能を持つバッテリーマネジメントシステム（BMS）が収められており、これらの自動車用の充電式電気エネルギー貯蔵システム（REESS）はバッテリーパックと呼ばれる（図1）。



図1 左：日産リーフ用バッテリーパック、中：圧壊試験装置、右：UN/ECE R-100.02における圧子形状

本研究開発の対象である圧壊試験は、バッテリーパックの機械的負荷に対する安全性試験であり、国連の協定規則「UN/ECE R-100.02 Part 2」や、中国のGB規格に従って実施される認証試験である。UN/ECE R-100では、バッテリーパックを規定の形状の圧子で100kN以上105kN以下の荷重で押圧し、一定時間の保持中に構造の健全性が失われて火災、爆発、液漏れなどが発生しないことが要求されている（図1）。

試験中は、圧子の押しこみ量ならびに反力がモニターされており、供試体への圧子の食い込みや供試体の局所的な損傷によって時々刻々と変化する様子が観測可能である。しかしながら、バッテリーパック内部の強度部材の損傷がどのように進展し、結果として押し込み量や反力の変化に繋がっているかについては直接観測できないため、バッテリーパックの構造改善のためのフィードバックが困難である。また、試験規格として明記されていない供試体の設置方法などの試験条件が試験結果に及ぼす影響が明確でなく、試験結果が事前の想定と異なった場合に試験条件の妥当性を示すことが困難である課題がある。

したがって、本研究開発により、計測データによるフィードバックと力学シミュレーション、AIを組み合わせることで、信頼性の高い現象可視化、高速な最適条件探索が可能となり、上記の課題を解決する。本研究開発の成果として開発するソフトウェアシステム「圧壊試験時の内部状態可視化システム」は、現実の試験装置（物理空間）の稼働時に、試験機（ロードセル）の測定値や供試体の変形状態の計測データを収集しながら、仮想空間（AIで作成した代理モデルや力学シミュレーション）におけるパラメータ空間を探索し、更には物理空間の計測データと、仮想空間の代理モデル、力学シミュレーションを組み合わせることで、圧壊過程を高精度にリアルに再現し、可視化するシステムである。

従来、圧壊試験は、バッテリーパック製造メーカーや自動車メーカーから、外部の試験認証機関に依頼される。試験結果は、圧壊荷重とストロークによって定量的に示されるが、試験結果の定説的な説明

(バッテリーパック内部の損傷部位の把握や、供試体設置条件等の試験条件の妥当性の評価)が得られないため、構造設計の手戻り工数が増大している。本開発によって導入する2つのシステム「試験条件最適化システム」、「内部状態可視化システム」によって、バッテリーパック内部の損傷部位の把握と、試験条件の最適化を実現し、バッテリーパックの安全性担保のための設計開発工数を削減することが可能となる。従来技術と新技術の対比、新技術を実現するための研究課題を、図 2 ならびに表 1 に示す。

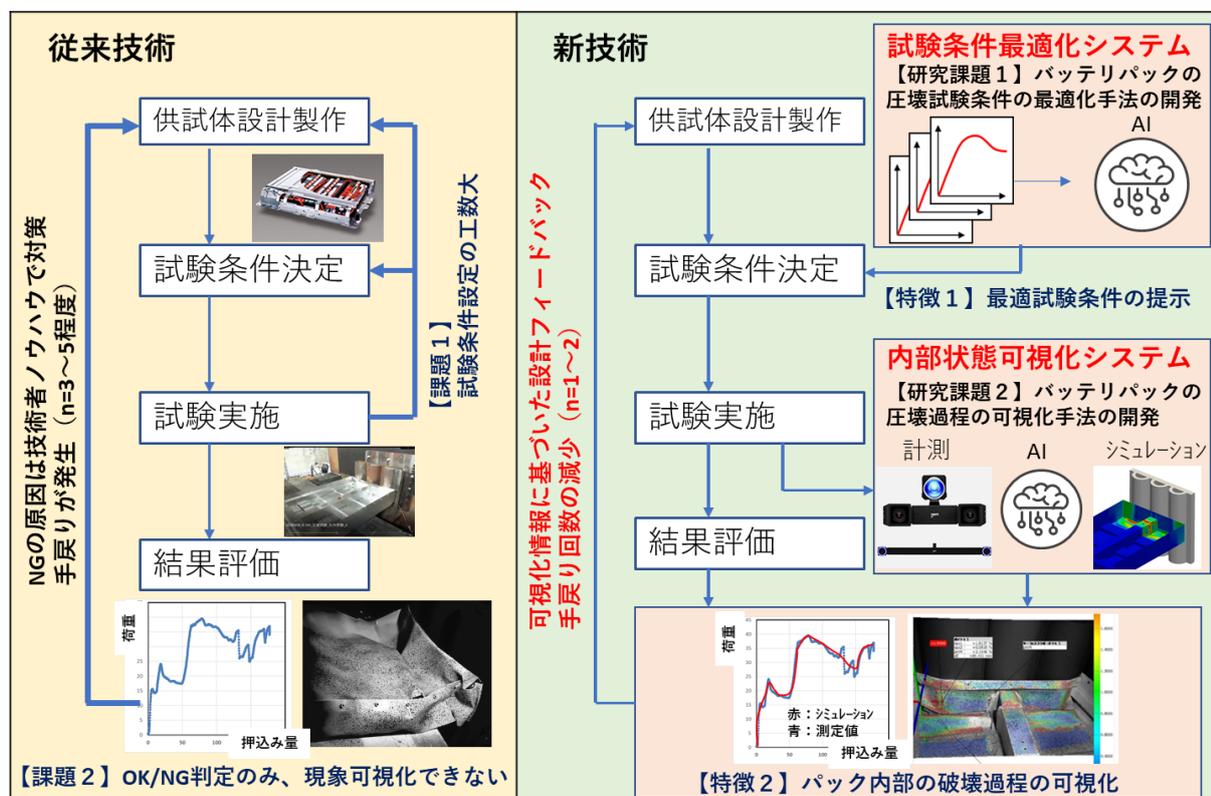


図 2 従来技術と新技術の比較、新技術による課題解決の効果

表 1 従来技術と新技術の対比、新技術を実現するための研究課題

従来技術	新技術
<p>【従来技術の課題】</p> <p>1. 圧壊試験における不確定な試験条件（供試体の設置方法、拘束方法など）の、試験結果への影響が不明確であり、試験条件・結果の妥当性が説明できない</p> <p>2-1 圧壊試験における供試体内部の破壊過程が直接観測できないために、試験結果の解釈とバッテリーパックの構造設計へのフィードバックができない</p> <p>2-2 従来の力学シミュレーションによる破壊過程の予測手法は、不確定な入力条件に依存するために定量的な結果保証が困難である</p>	<p>【新技術の特徴】</p> <p>非接触の歪計測装置、力学シミュレーション、AIより構成される圧壊試験中の内部状態可視化システムを開発することにより、</p> <p>1 圧壊試験における試験条件（設置方法、拘束方法）の最適化により、試験の妥当性を提示することが可能</p> <p>2-1 圧壊試験中の供試体内部の破壊過程を可視化することが可能となり、試験結果解釈・構造設計へのフィードバックを実現</p> <p>2-2 開発する内部状態可視化システム（計測機+力学シミュレーション+AI）は、従来の力学シミュレーション単体では困難だった定量的な結果保証が</p>

	可能			
【研究課題・内容との関係】	開発項目の寄与	◎：主、○：従		
	新技術の特徴	1.	2.	3.
研究課題・内容				
【1】 バッテリーパックの圧壊試験条件の最適化手法の開発			◎	○
【2】 バッテリーパックの圧壊過程の可視化手法の開発		◎		○

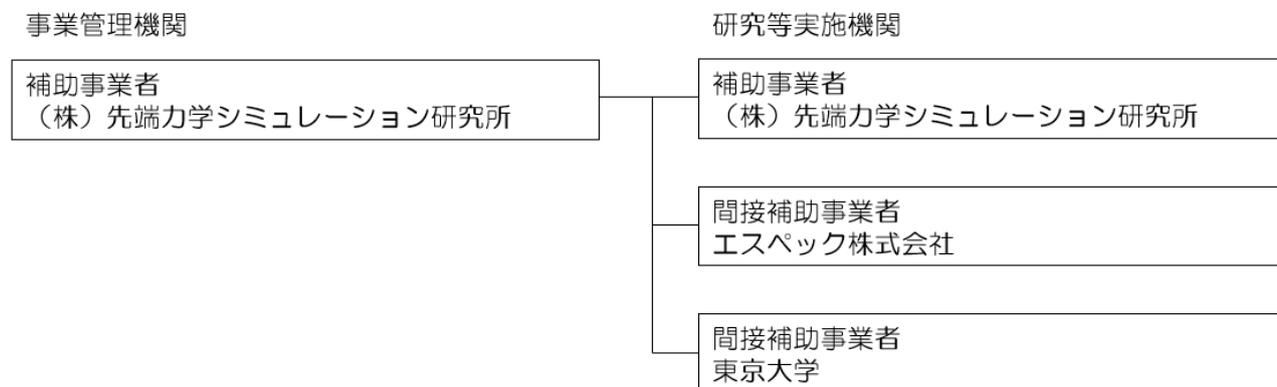
これら従来技術の課題に対して、本研究開発では「バッテリーパックの圧壊試験条件の最適化手法の開発」ならびに「バッテリーパックの圧壊過程の可視化手法の開発」を実施する。

圧壊試験においては、試験条件（供試体の設置、拘束）ならびに供試体の製造要件（接合、締結、隙間など）における、試験結果への影響が不明確なパラメータが数多く存在し、試験条件・結果の妥当性の提示を困難にしている。したがって、力学シミュレーションを用いて、不確定なばらつきを含む試験条件や供試体の製造要件パラメータの感度ならび最適条件の探索を行う「バッテリーパックの圧壊試験条件の最適化手法」を開発する。これにより、圧壊試験のような、複雑な供試体構造で、かつ、試験条件（設置方法、拘束方法）に不確定さが含まれる試験に対して、試験条件並び結果の妥当性を提示することができる。

また、圧壊試験においては、カバーで覆われた供試体内部の破壊過程の観測ができず、試験結果の解釈や構造対策への折込みの工数が増大している。その対策として、既存の力学シミュレーションは、バッテリーパック全体の内部状態を仮想的に評価できる手段であるが、複雑な構造や発生する破壊現象を事前に精度良くモデル化することが困難であり、結果の信頼性の面で劣る。一方で、計測器によるアプローチは、計測したデータの信頼度は高いものの、計測可能な範囲は限定されている。したがって、カメラを用いた非接触ひずみ測定器による計測データと、力学シミュレーション、AI による内部状態予測手法を組み合わせた、「バッテリーパックの圧壊過程の可視化手法」の開発を行う。これにより、直接観測できない内部の構造部材の損傷状況を、少し離れた位置の計測状況と力学シミュレーション結果とで補完することにより評価することができる。

## 1-2 研究体制

- 研究組織、管理体制



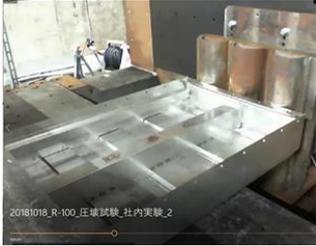
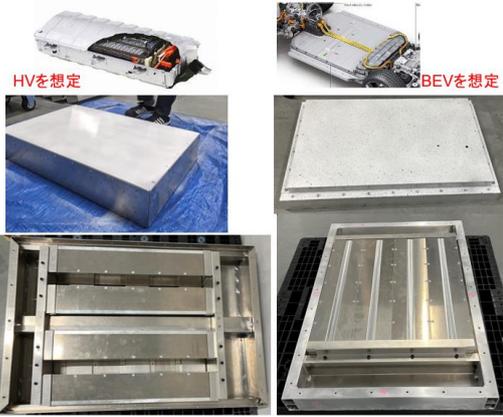
## 第2章 本論

### 2-1 バッテリーパックの圧壊試験条件の最適化手法の開発

圧壊試験の力学シミュレーションは、バッテリーパックの構造（薄板構造で溶接や締結などの接合要素を含む）ならびに変形状態（局所的な塑性大変形と自己接触の発生）の複雑さの観点から難易度が高い。そこで、複雑構造で接触や材料非線形をふくむ複雑な変形状態を再現した力学シミュレーションを実施するための、基本的なモデリング手法を確立し、試験条件の不確かさ評価システムならびに最適化システムを開発した。

表 2に示すように、初年度は簡易形状からスタートして、徐々に実機に近い複雑な構造を対象に研究開発を推進した。最終年度においてはアルミ板金をスポット溶接で接合した構造、ならびに、アルミ押し出し材フレームをアーク溶接にて接合した構造の2種の構造に対して、内部に模擬バッテリーモジュールを搭載した試験供試体を製作し、それぞれ試験計測ならびにシミュレーションモデリングの構築を実施した。

表 2 圧壊試験モデリング手法の対象モデル

令和2年度	令和3年度	令和4年度
簡易形状サンプル （はりの組合わせ）  	実機模擬形状サンプル  	実機相当形状サンプル Ver1：板金＋スポット溶接構造 Ver2：押し出し材フレーム構造 それぞれ、模擬電池とふたを装着  

## 2-1-1 圧壊試験シミュレーションの基本モデリング技術の開発

製作した実機模擬形状サンプル、ならびに、対応するシミュレーションモデルを図 3 に示す。シミュレーションモデルにおいては、基本的にシェル要素を用いた。また、スポット溶接ならびにビード溶接部については、適切な拘束モデルを付与した。

実機模擬形状サンプルの圧壊試験において、試験体に作用する押込み荷重とストロークの関係を図 4 に示す。試験結果とシミュレーション結果の比較により、シミュレーションモデルが荷重ピークの発生タイミングならびに大きさを妥当に評価していることを確認した。圧壊試験中の実機模擬形状サンプル変形挙動、シミュレーションにて評価したものが図 5 である。また、図 6 は圧壊試験後の実機模擬形状サンプルのふたを外した状態である。

これにより、シミュレーションによって、圧壊ストロークの進展によって発生する荷重ピークの発生を、試験サンプルの局所的な座屈や塑性変形の発生と関連付けて評価する事ができる。実機模擬形状サンプルの例では、ストローク 5mm 付近の初期の荷重降伏が圧壊子先端の局所つぶれ開始に対応しており、ストローク 80mm 付近の急激な荷重上昇が圧壊子先端の局所つぶれが終了して試験供試体の構造全体で荷重を支えるモードへ遷移したことが確認できる。

また、試験終了後の最終時刻の試験供試体の形状がシミュレーションによって得られる形状とよく一致しており、荷重-ストローク関係の、荷重ピークの発生高さ、ピークの発生時刻と合わせて、シミュレーション結果が試験結果をよく再現できていることが確認できた。

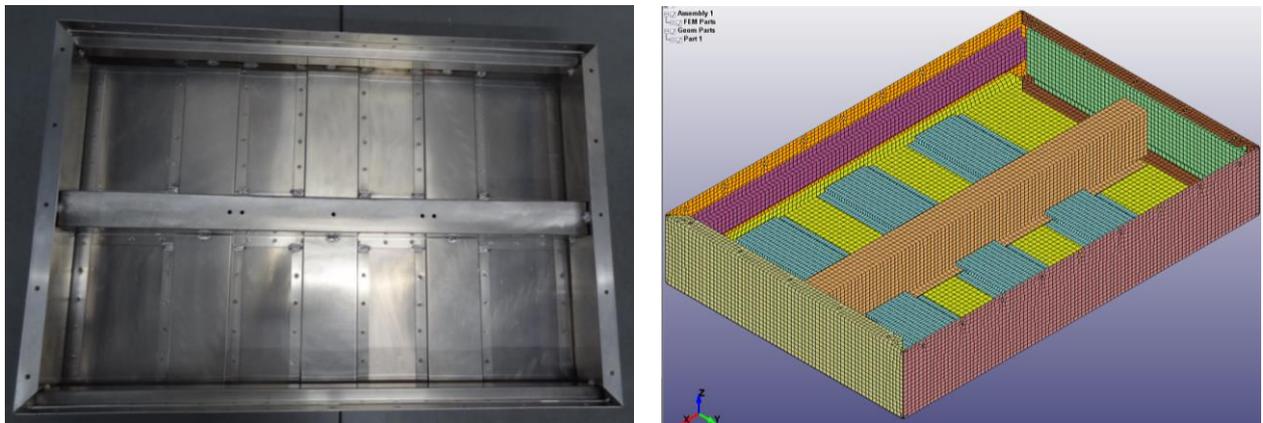


図 3 実機模擬形状サンプルとシミュレーションモデル

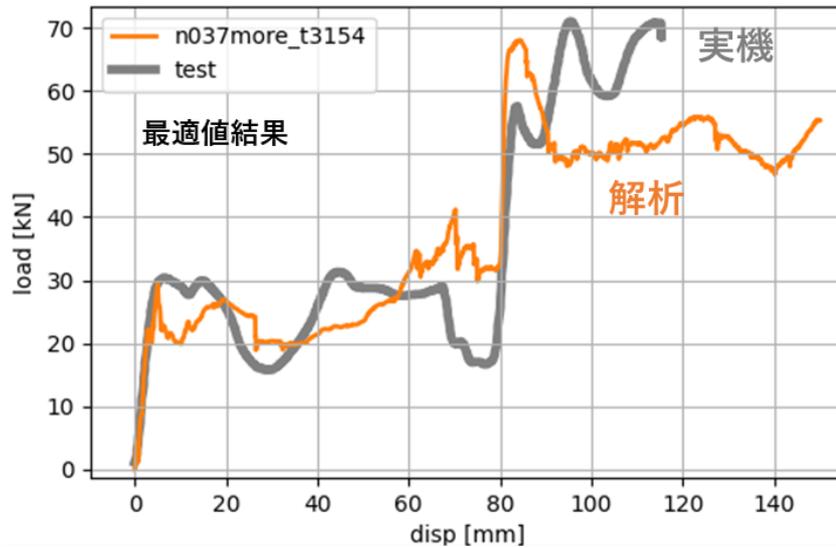


図 4 実機模擬形状サンプルの圧壊試験時の荷重—ストローク関係

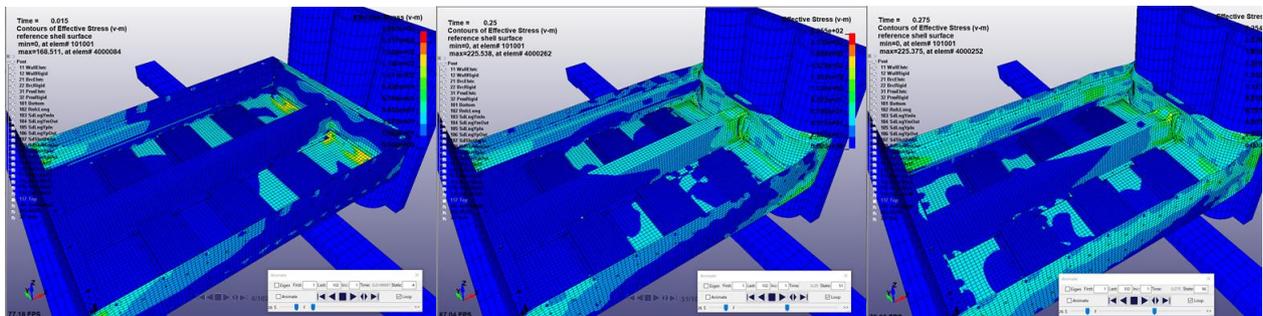


図 5 実機模擬形状サンプル（ふた非表示）の圧壊試験時の形状変化（左：ストローク 10mm 付近、中：ストローク 75mm 付近（荷重上昇前）、右：ストローク 85mm 付近（荷重上昇後））



図 6 圧壊試験後の実機模擬形状サンプル（ふた取りはずし後）

## 2-1-2 圧壊試験シミュレーションによる不確かさ評価技術の開発

圧壊試験シミュレーションにおいては、バッテリーパックの構造ならびに変形状態は極めて複雑であり、全ての物理条件パラメータ（構成部材の材料特性や部材の接合条件、ならびに、圧壊試験の供試体設置条件等）、及び数値解析パラメータ（FEM 要素種類、構成モデル、数値解析スキーム等）を事前に一意に決定することは困難である。

そこで、上記の不確定条件について統計分析を実施し、パラメータやモデルの感度、寄与の評価から、試験の不確かさや、もっとも確からしい試験条件、ならびに試験結果を求める手法ならびにシステムを開発した。

不確かさ条件として、試験機に対する試験体の設置条件を取り上げた事例を示す。不確かさパラメータとして、 $x$ 方向の設置角度 $\theta_x$ 、 $y$ 方向の設置角度 $\theta_y$ 、 $y$ 方向の平行移動量 $d_y$ の3つを選定し、LHS（Latin Hypercube Sampling）によって100ケースのサンプリングシミュレーションを実施した。図7に、簡易形状サンプルならびに実機模擬形状サンプルにおけるパラメータの定義を示す。

簡易形状サンプルにおける不確かさ評価の事例を図8に示す。設置条件の変化は、荷重-ストローク関係の第1ピークにはほとんど影響しなかったが、一方で、第2、第3ピークにおいては設置条件のわずかな変化が変形モードに大きく影響し、結果として荷重-ストローク関係にも大きな差異が発生することが確認された。

また、実機模擬形状サンプルにおける設置位置条件の影響を図9に示す。実機模擬形状モデルでは、設置条件の影響は簡易形状サンプルの場合と異なることが示されている。実機模擬形状サンプルでは、設置条件パラメータの影響は初期荷重ピークにおいて顕著であるが、一方で第1ピーク以降のパラメータにおいては設置条件の影響は小さくなっていることが確認できる。

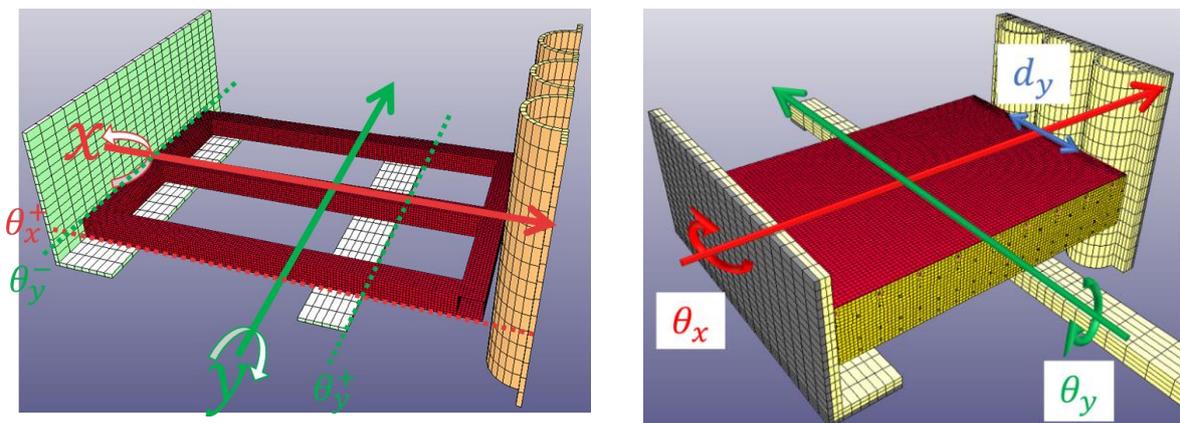


図7 簡易形状サンプル（左）ならびに実機模擬形状サンプル（右）の設置位置条件

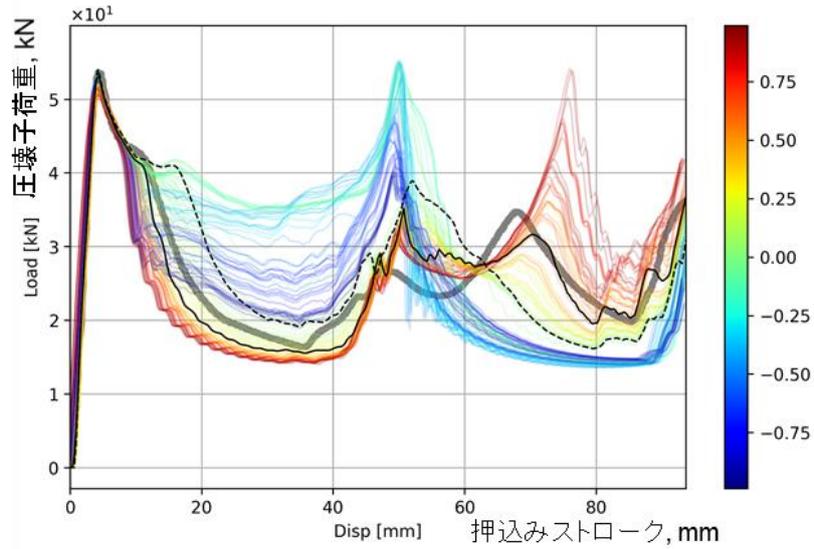


図 8 設置位置をパラメータとした簡易形状サンプルの不確かさ評価

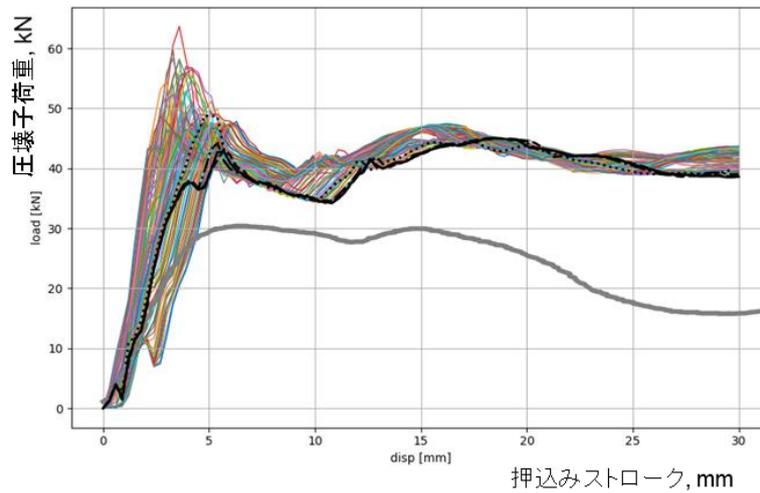


図 9 設置位置をパラメータとした実機模擬形状サンプルの不確かさ評価

本プロジェクトにおいては、正規分布によって表される確率分布を重みとした重ね合わせにより、荷重-ストローク関係に対する不確かさの影響を一目瞭然に示す手法を開発した。図 10 に示すように、設置位置条件が不確かな中で、荷重-ストローク関係の平均曲線と、 $2\sigma$ の範囲の分散表示を行うことで、入力パラメータの不確かさが荷重-ストローク関係にどのような影響を与えているのかを一目瞭然に可視化することができる。

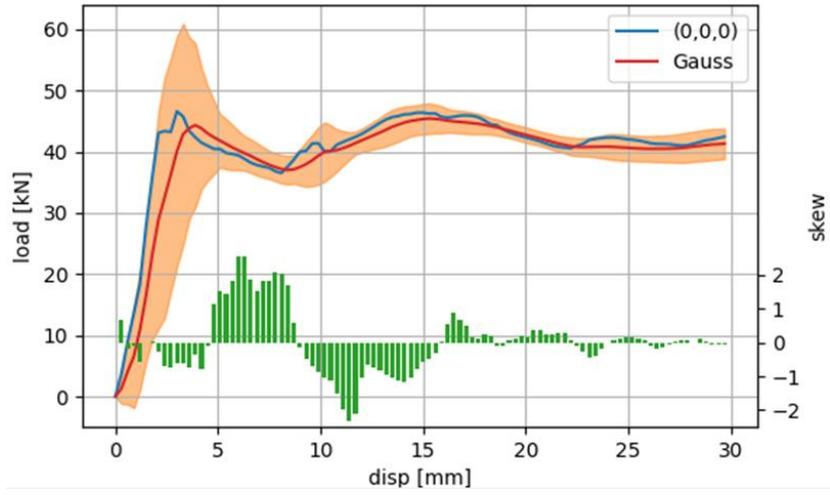


図 10 荷重—ストローク関係の不確かさ表示

### 2-1-3 圧壊試験シミュレーションによる最適化技術の開発

圧壊試験シミュレーションにおいて、あらかじめ特定することが困難な多数のパラメータが存在し、シミュレーション結果に影響を及ぼす。したがって、計測データとシミュレーション結果が一致するように不確かなパラメータ（供試体の設置方法、材料特性、溶接接合条件など）を最適化するためのシステムを構築した。

ここでは、実機模擬形状サンプル（図 3）を対象に、表 3 に示す設計パラメータを選定し、最適化を行った事例を示す。

表 3 実機模擬形状サンプルの設計パラメータと、パラメータ空間の最大/最小値

パラメータ		最小値	最大値
アルミ材	降伏応力 (MPa)	50	150
	接線係数 (MPa)	100	2000
スポット溶接ナゲット	ヤング率 (GPa)	1	64
	降伏応力 (MPa)	10	200
	接線係数 (MPa)	100	2000
	破断ひずみ	0.01	0.1
初期配置	X 角度 (degree)	0	1
	Y 角度 (degree)	-1	1
	Y 変位 (mm)	-5	5

図 11 は、ストローク 9mm までの 100 ケースの荷重-ストローク関係を重ね合わせ表示したものである。これにより、初期の荷重立ち上がりならびに荷重降伏と関連が強い、アルミ材料の塑性特性パラメータが主に同定される。また、図 12 は、一致度の上位 30 ケースのパラメータセットを用いて、最終ストローク 150mm までの荷重-ストローク線図をシミュレーションで計算し、重ね合わせ表示したものである。初期の荷重立ち上がり後は、複数のスポット溶接個所にひずみが集中して断続的に溶接部破損が発生するため、荷重-ストローク線図の全領域での一致度の高いパラメータセットを選択することで、スポット溶接クラッド材の特性パラメータが決定されるものと考えられる。

ここで得られた最適パラメータセットは、アルミ材の降伏応力 75.5MPa、接線剛性が 717.5MPa、スポット溶接ナゲットのヤング率 62GPa、降伏応力 66MPa、接線剛性 1401MPa、破断ひずみ 0.09955 である。また、この時の試験供試体の設置条件は Y 方向変位 0.85mm、Y 軸まわり回転角度 $-0.81^{\circ}$ 、X 軸まわり回転角度 $+0.825^{\circ}$  と予想される。

これらの最適パラメータを用いたシミュレーションによる荷重-ストローク線図が図 13 であり、荷重の推移が試験計測結果と良く整合していることが確認できる。

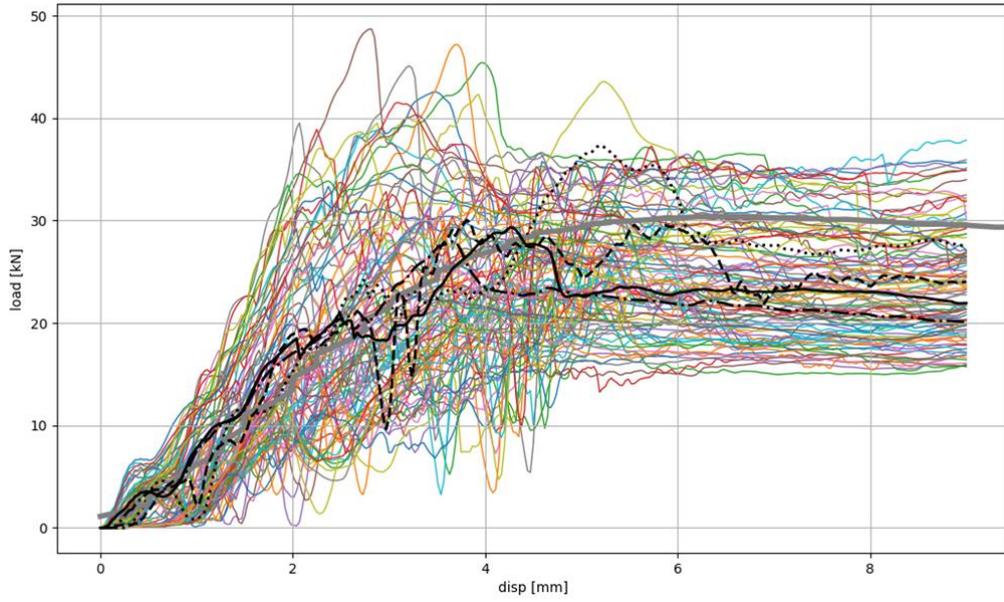


図 11 初期ストローク（9mm まで）のパラメータ探索 100 ケース

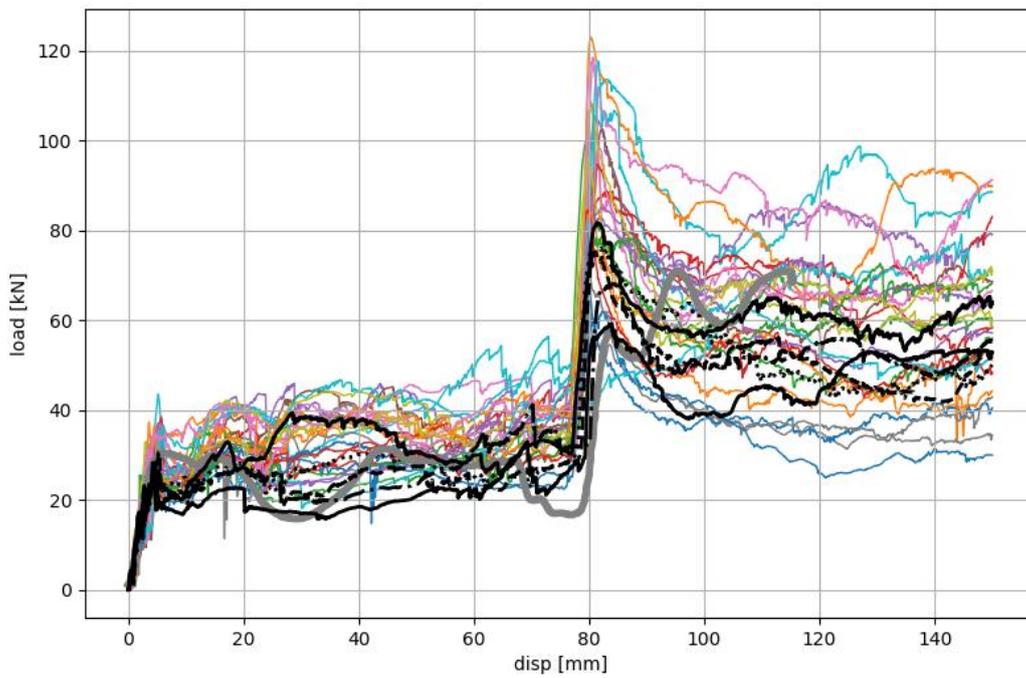


図 12 最終ストローク（150mm まで）のパラメータ探索 30 ケース

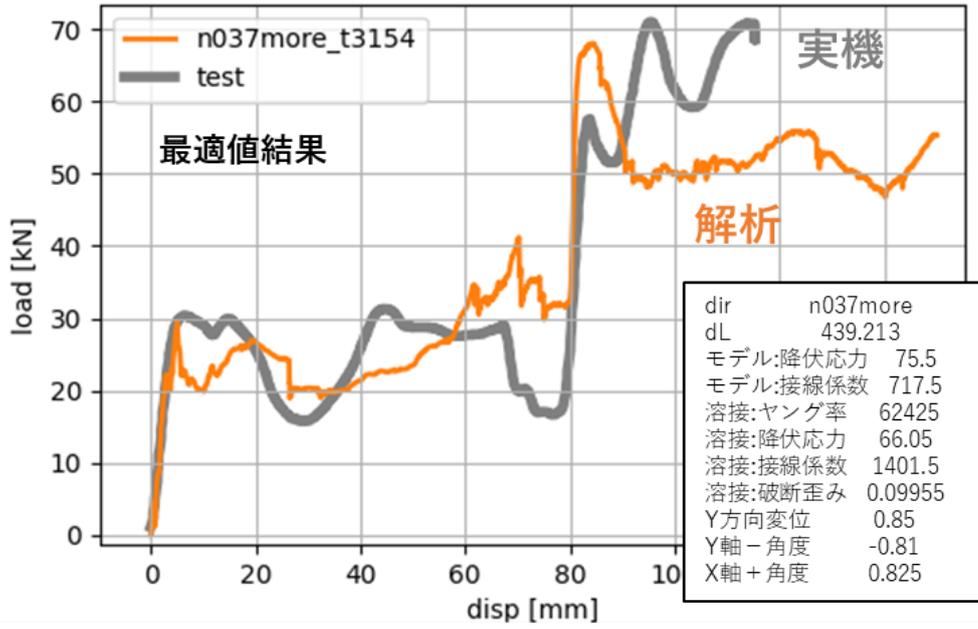


図 13 最適パラメータを用いた荷重-ストローク線図

## 2-2 バッテリーパックの圧壊過程の可視化技術の開発

### 2-2-1 圧壊試験計測技術の開発

内部状態可視化システムによる内部状態の評価を行うために、DIC 計測装置（GOM 社 ARAMIS）を用いて、圧壊試験中にバッテリーパック表面の変形・ひずみ挙動を計測する技術を開発した。

DIC 計測装置外観、ならびにステレオカメラのキャリブレーションの様子を図 14 に示す。

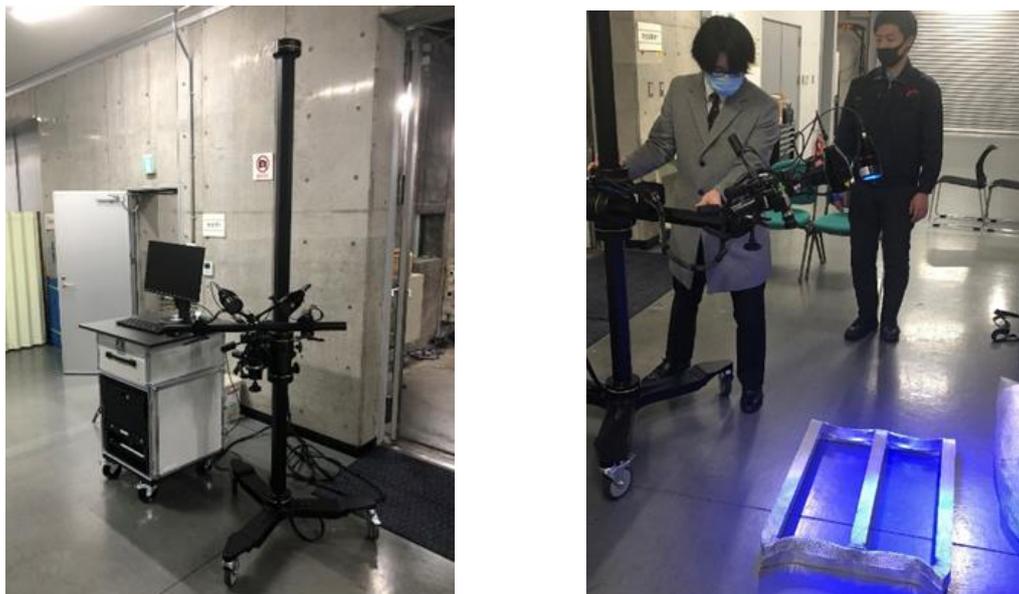


図 14 デジタル画像相関法（DIC）3次元変位・変形計測装置  
（左：装置全体、右：ステレオカメラキャリブレーション作業）

実機模擬形状サンプルによる DIC 表面ひずみ計測事例を示す。図 15 に示すように、圧壊試験前に白色の下地塗装ならびに黒色のランダムドットパターンを付与した。

本プロジェクトでは、カメラで観測可能な表面ひずみ分布から、観測できない内部構造の状態を予測・可視化できるシステムの基盤技術開発を行っている。したがって、同一の変形状態において表面ひずみのどの位置を観測するのが適切かを検討するために、カメラの設置位置を試験体の上面、ならびに側面に設置した2種類の計測を実施した事例を、図 16 ならびに図 17 に示す。

このように、本研究開発においては、複数の模擬バッテリーパック形状に対して、色々な方向から計測する技術基盤を構築する事ができた。また、本計測においては座標変換ならびに時系列データのフィッティングを行う事で、対応するシミュレーション結果と重ね合わせたパラメータ感度解析技術ならびにパラメータ最適化技術を開発した。

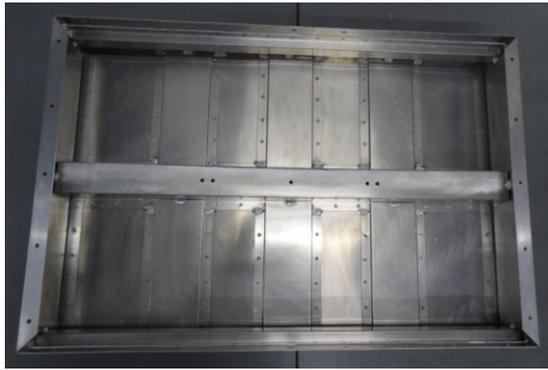


図 15 圧壊試験前の実機模擬形状サンプル（左：ふた装着前、右：ふた装着、パターン付与後）

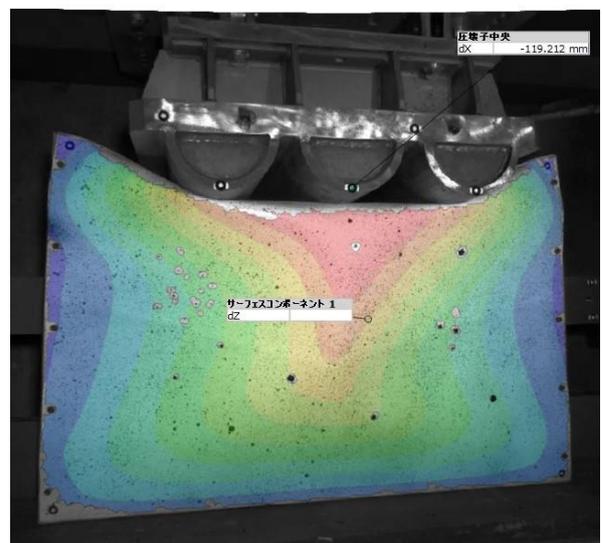
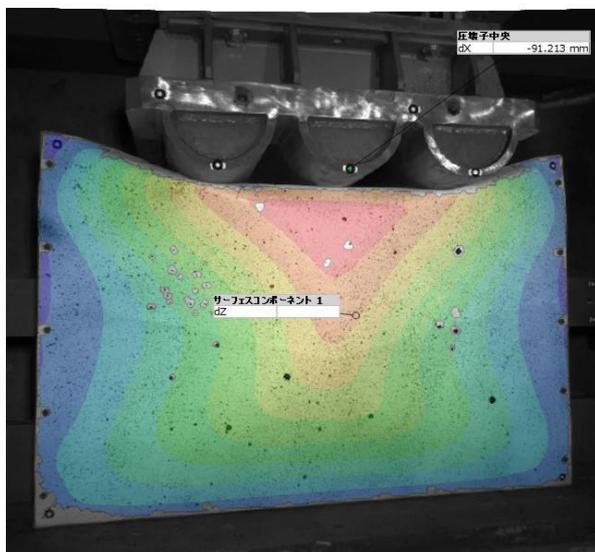
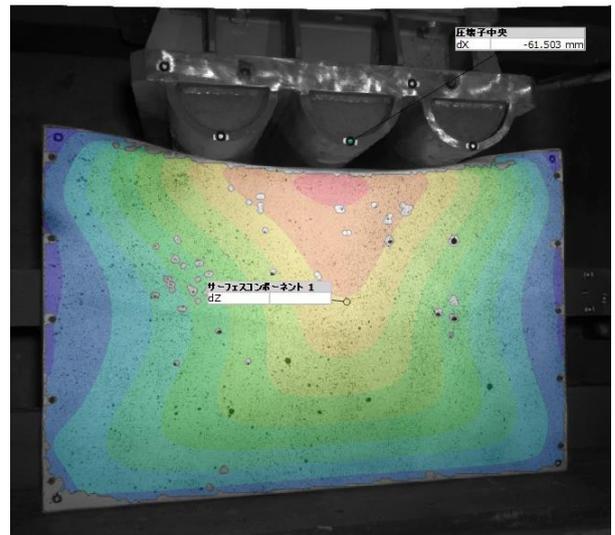
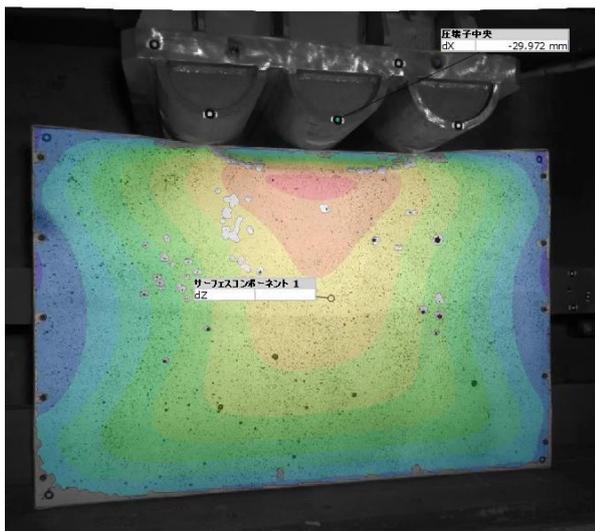


図 16 DIC による圧壊試験時の実機模擬形状サンプルの上面変位分布の計測  
 （左上：ストローク 30mm、右上：ストローク 60mm、  
 左下：ストローク 90mm、右下：ストローク 120mm）

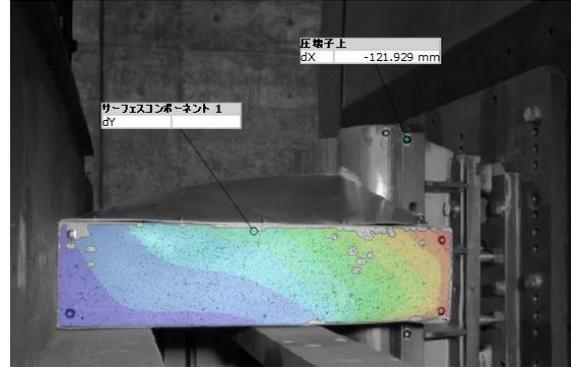
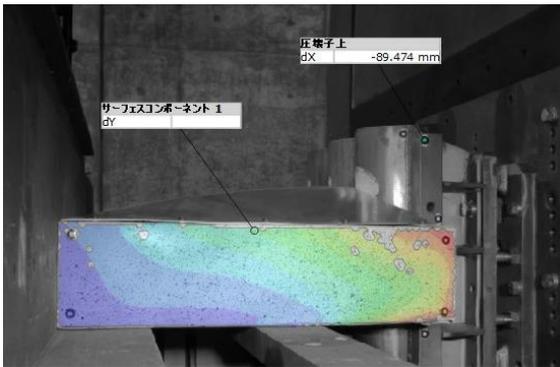
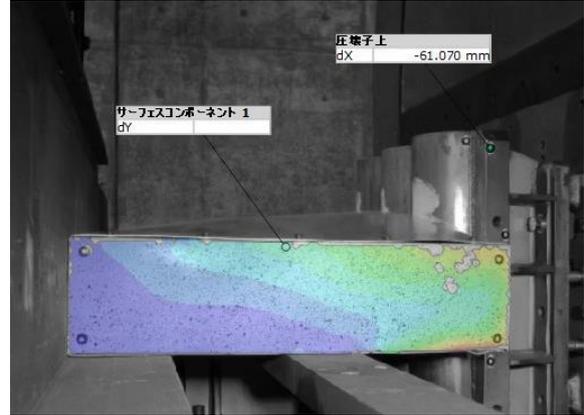
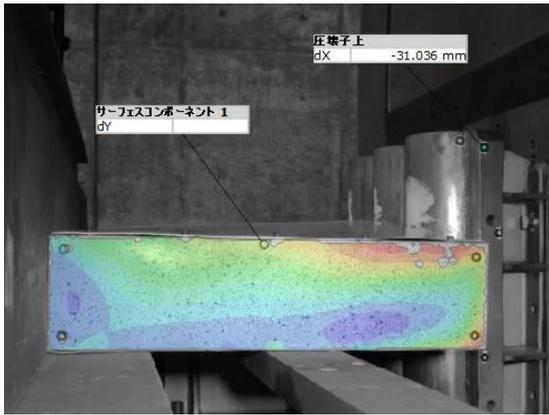


図 17 DIC による圧壊試験時の実機模擬形状サンプルの側面変位分布の計測  
 (左上：ストローク 30mm、右上：ストローク 60mm、  
 左下：ストローク 90mm、右下：ストローク 120mm)

## 2-2-2 AIを活用した内部損傷状態予測技術の開発

本モニタリング手法の開発目的の一つは、非接触計測システムでは評価できないバッテリーパック内部の構造部材のひずみ等を予測して、バッテリーパックの構造設計フィードバックに資する評価を行うことである。ここで開発するAI活用内部損傷状態予測システムは、AIが力学シミュレーションによる力学的予測を学習し、シミュレーションに代わって内部損傷状態を予測する、シミュレーション代理モデルの応用である。一般的な代理モデルでは、シミュレーションと同じように境界条件等の入力に対して応力、ひずみ等の結果を予測するが、本システムにおいてはシミュレーション結果のひずみ分布からシミュレーション入力の仮想内部損傷を求める、AIによる逆方向の予測となる(図18)。

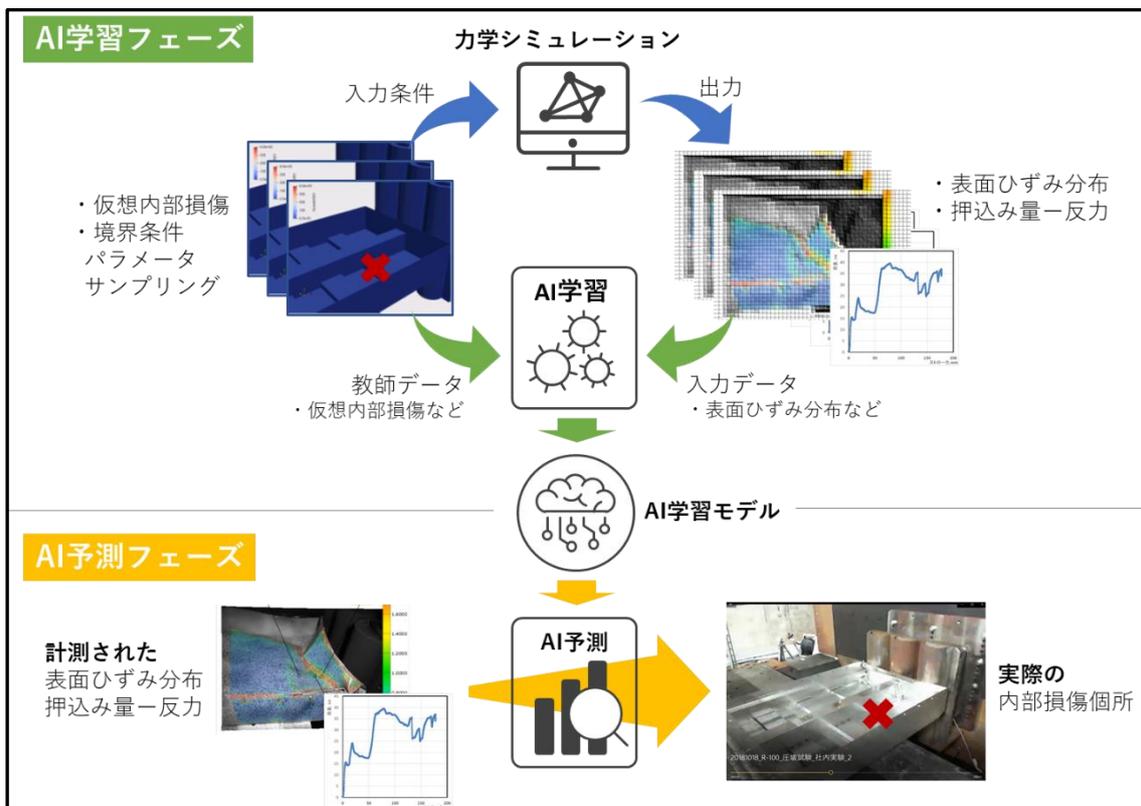


図 18 内部損傷状態評価ツール：AI学習フェーズと予測フェーズ

AI学習フェーズにおいては、力学シミュレーションの入力パラメータとして内部損傷状態、ならびにその他の設計パラメータをサンプリングした学習用の多数のシミュレーションデータセットが必要である。したがって、本開発においては学習データの生成システムを開発した。図19に示すように、本学習データ生成システムは、「試験条件最適化システム」ならびに「内部情報可視化システム」と統合されている。

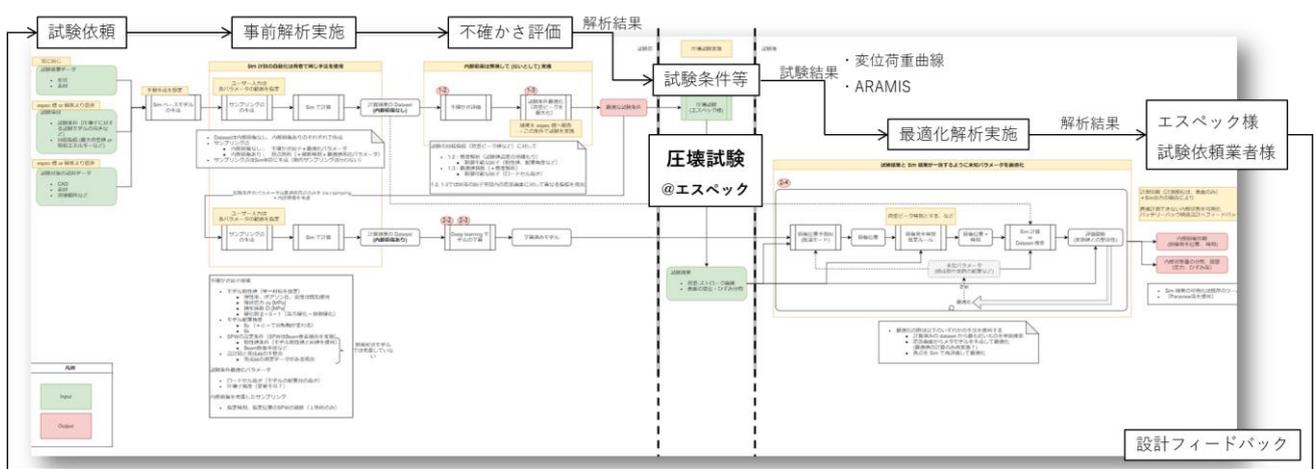


図 19 「試験条件最適化システム」と「内部情報可視化システム」

本開発において、1000 ケースの学習用データセットを作成し、仮想内部損傷状態から圧壊試験時の形状変化（変位分布）を予測する AI 代理モデルを生成した。学習に用いなかった検証ケースに対して、シミュレーション結果と AI 代理モデルによる変位分布を比較検証した結果を図 20 に示す。入力損傷位置の図に初期板厚の薄い位置が示されており、その場合の AI 代理モデルによる変位分布が力学シミュレーションを精度よく再現できていることが確認できた。また、予測した変位分布を3次元表示したものを図 21 に示す。このように、AI 代理モデルによる変位分布予測が力学シミュレーションを十分に再現している事が確認された。

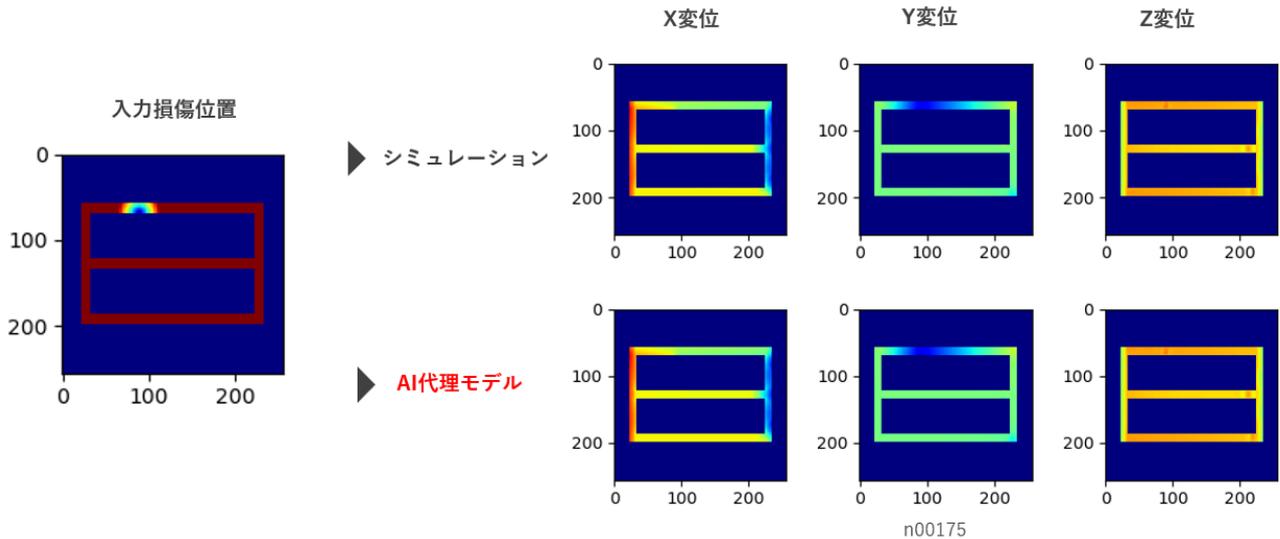


図 20 AI 代理モデルによる順方向予測（変位分布）

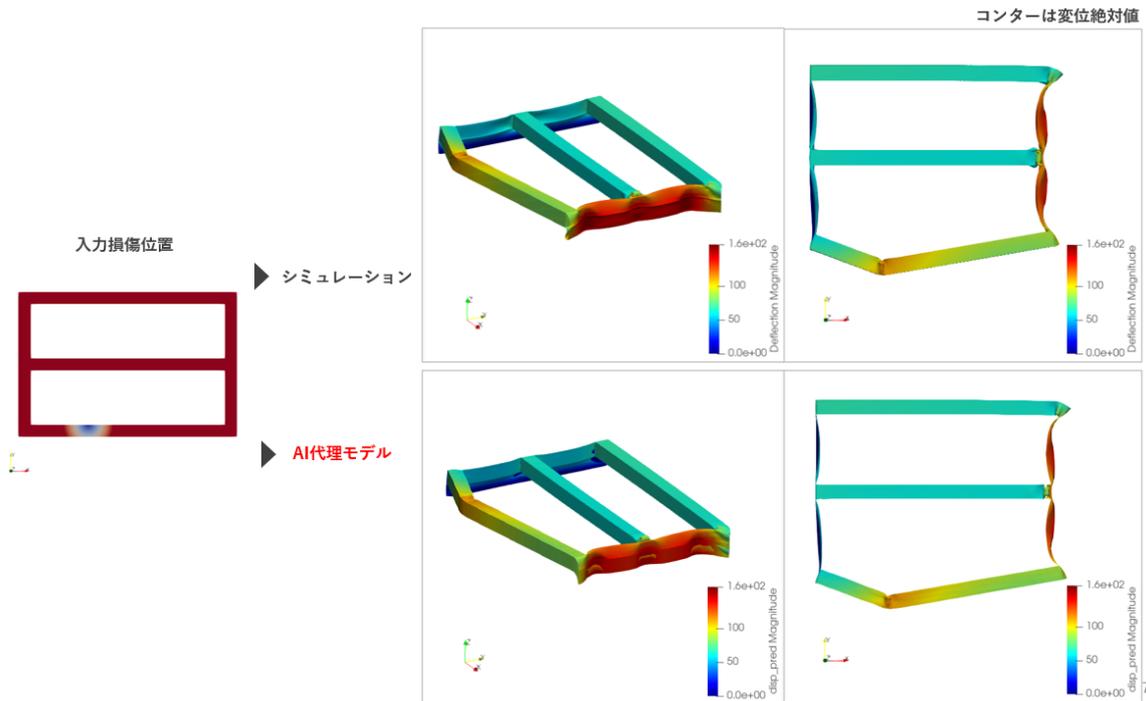


図 21 AI 予測結果とシミュレーション結果の比較（3次元表示）

図 18 に示す AI 予測フェーズにおいて、計測された「表面ひずみ分布」や「押し込み量—反力」から内部損傷箇所を予測するためには、図 20 に示す順方向予測とは逆方向の予測が必要になる。

本開発で構築した逆方向予測 AI 代理モデルの実行結果を、図 22 に示す。X、Y、Z 方向成分の変位分布を AI 代理モデルに入力することで得られた初期板厚分布は、力学シミュレーションの入力条件として与えた初期板厚分布とよく一致することが確認できる。

このような逆方向予測 AI 代理モデルの挙動は、DIC 計測装置で計測した表面変位・ひずみ分布から内部状態（仮想内部損傷）を予測することに相当する。しかしながら、計測装置で計測した分布データは、力学シミュレーションより得られる分布データと異なり、図 23 に示すようなデータ欠損が発生する場が多い。したがって、データ欠損に対応するための AI 代理モデルの改良を行った。

図 24 に示すように、欠損データから初期板厚分布が予測できる改良 AI 代理モデルは、力学シミュレーションによる検証データとよく一致することが確認できた。

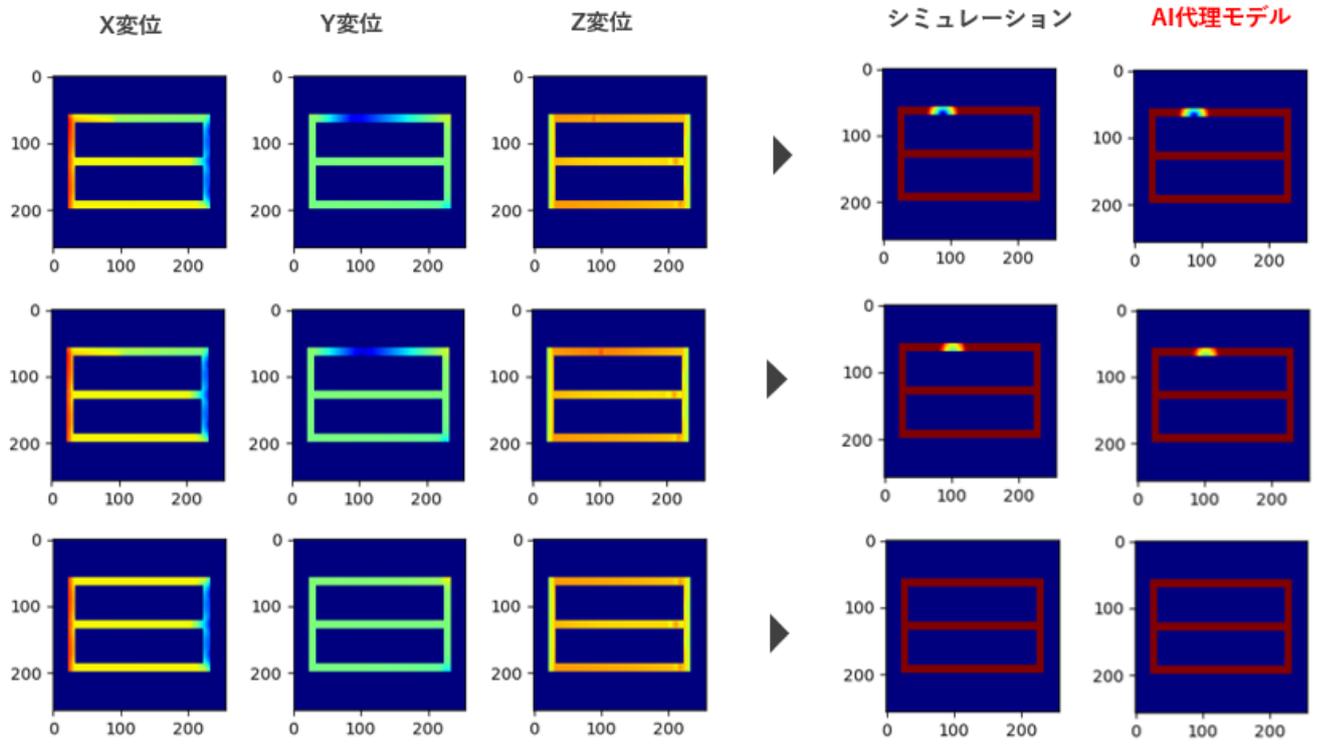


図 22 AI 代理モデルによる逆方向予測結果



図 23 DIC 計測装置より取得した簡易形状モデル計測データ

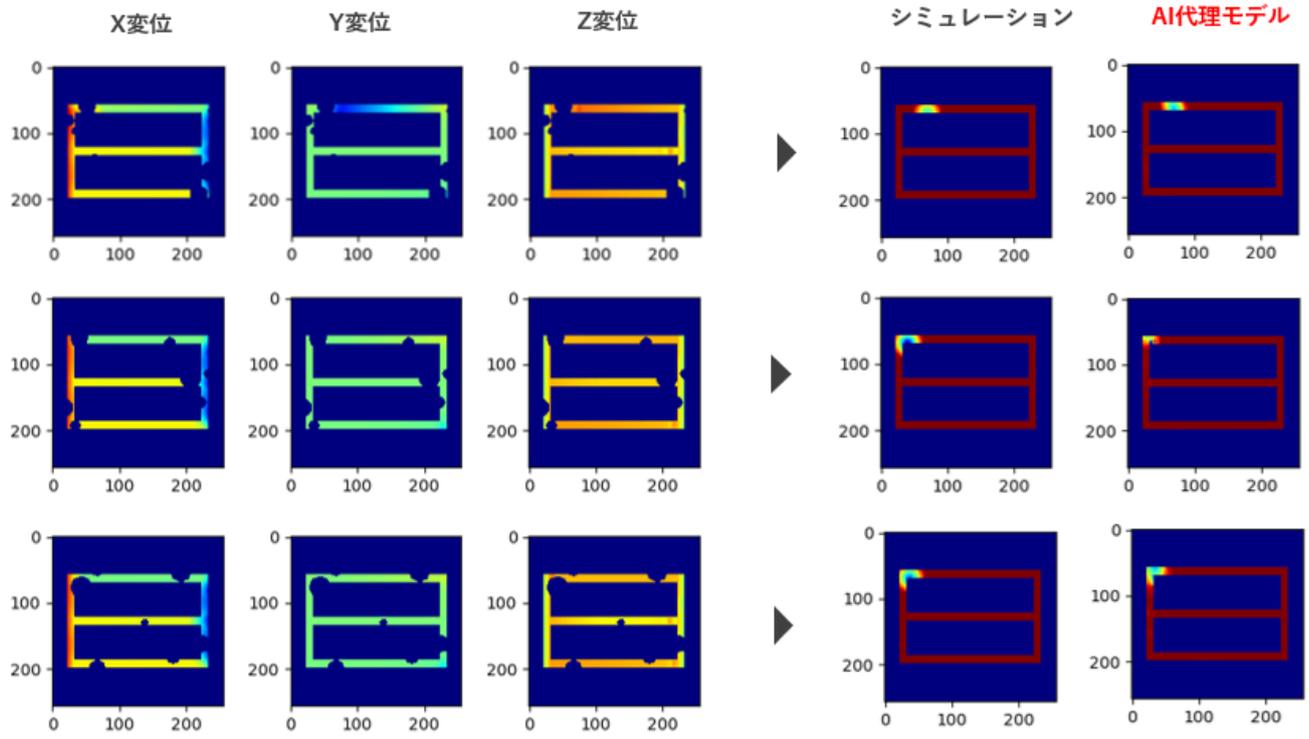


図 24 欠損を含む入力データを用いた逆方向予測モデルの実行結果

### 2-2-3 オープンソースFEMコードFrontISTRを用いた圧壊試験シミュレーション技術の開発

シミュレーションによる統計評価や、AI 代理モデルに必要な学習データを作成するためには、多数のパラメータを体系的にサンプリングした多数ケースのシミュレーションを実行する必要がある。これらの解析においては大量の計算機リソースが必要とされ、また、商用ソフトウェアを使用する場合には対応するライセンス費用が要求される。このような場合、オープンソースソフトウェアはコスト低減のための有力な選択肢の一つである。また、ソースコードが公開されていることから、特定のニーズや扱う問題の特性・要件に合わせたカスタマイズも可能である。

本研究開発においては、東京大学で開発された FrontISTR(フロントイスター)を用いた圧壊試験シミュレーションの技術開発を行った。FrontISTRは、Windows やLinux のPC クラスタをはじめ、京などの超並列スパコンにも対応可能なオープンソースの構造解析ソルバーであり、一般社団法人 FrontISTR Commons によって、FrontISTR システムとプリ・ポストなどの維持管理、機能改良などの運営が行われている。

本節では、FrontISTR による圧壊試験シミュレーションの解析結果やLS-DYNA との比較、並列性能について示し、圧壊試験シミュレーション技術の開発に向け、特に大量の学習データ生成のツールとしての活用が期待される FrontISTR の実用性検証について述べる。

はじめに、圧壊試験シミュレーションに用いた解析モデル、解析条件、解析手法について説明する。実機模擬形状サンプル（以下、供試体）のモデルは、図 25 で示すようなアルミ底板とアルミフレームで構成され、アルミフレームは同図右で示すような薄板構造となっている。アルミ材の塑性特性などの諸元は、表 3 の値に沿って設定している。解析モデル全体は、図 26 に示すように供試体と圧壊試験機で構成され、節点数 234,904、要素数 188,820 である。圧壊試験機の壁側底面と側面は完全固定、圧壊子の端面を剛体でモデル化し、図中の矢印の方向に一定速度 3mm/sec で強制変位させる。供試体と圧壊試験機が接する面同士は、接触面ペアとして定義し、図 27 で示すように、壁側で2組、圧壊子側で2組、合計4組の接触面ペアが定義されている。接触ペアとして定義される面内の節点では、時事刻々と変化する変位に追従して接触探索がなされ、Lagrange 未定乗数法の適用によって各時点での接触状態や接触力が厳密に求められる。以上のような解析手法の下、FrontISTR を用いて最大 30mmの押し込みまでを模擬する時刻歴応答解析を行う。時間進展のアルゴリズムには、陰解法 (Newmark- $\beta$ 法) を採用し、時間増分は $\Delta t=5.0 \times 10^{-3}$ として計算した。

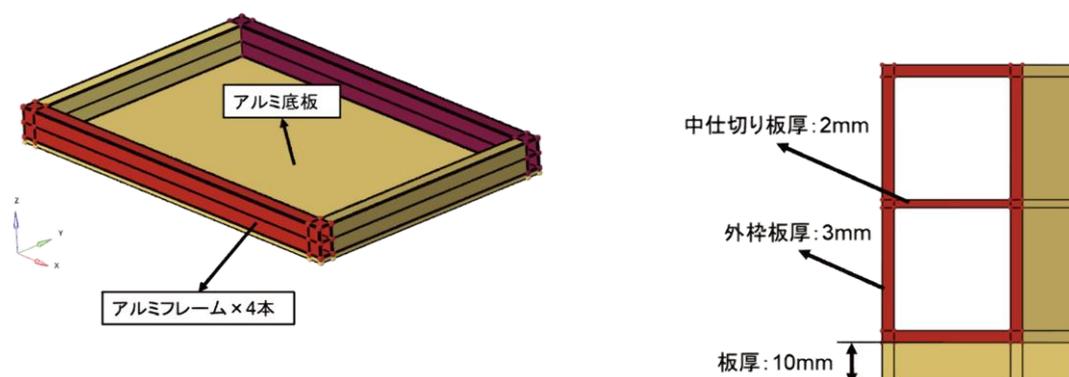


図 25 圧壊試験シミュレーションに用いた供試体モデルの概要

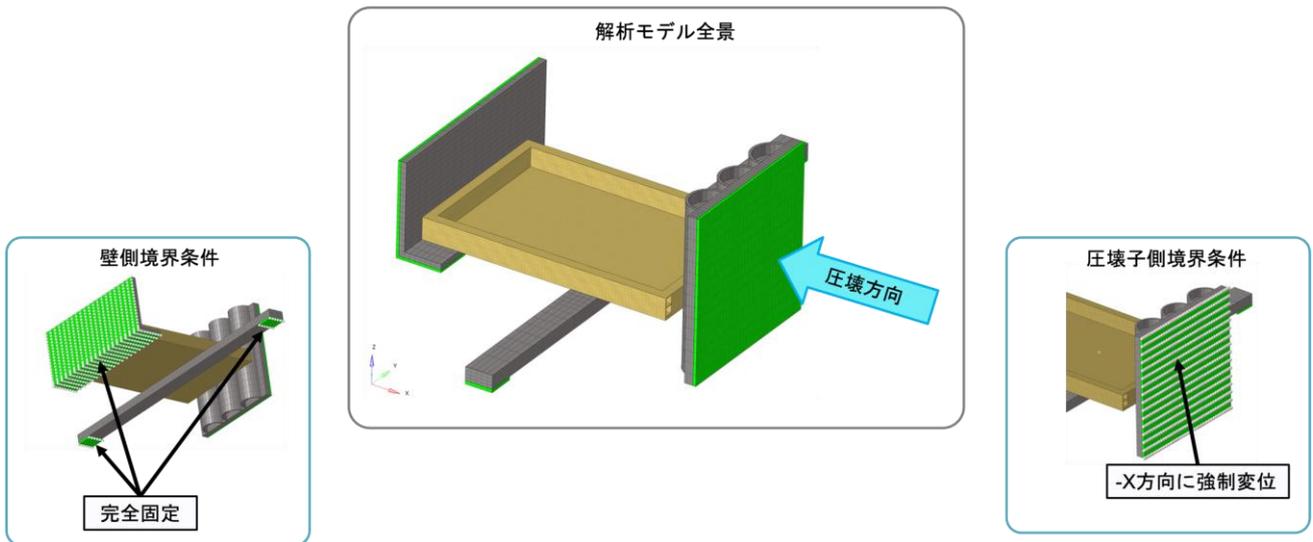


図 26 解析モデルと境界条件

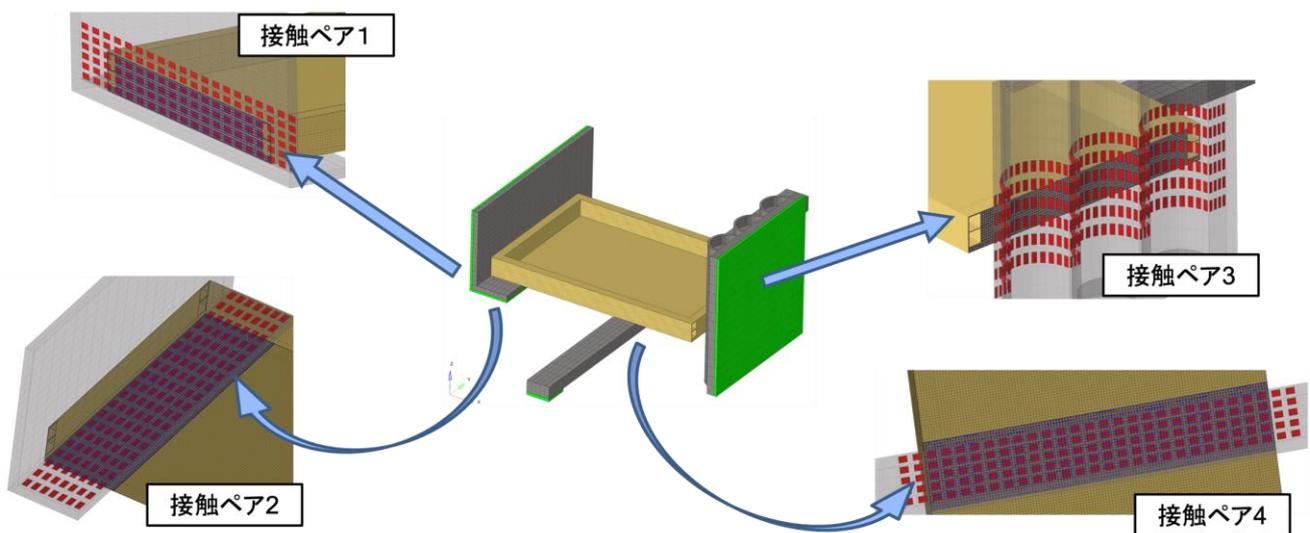


図 27 接触ペアの定義

解析結果を示す。図 28 は圧壊子の押し込み 25mm 時点での変形分布をコンター表示したものである。図 29 は、押し込み開始から 25mm に至るまでの荷重曲線の履歴を示す。FrontISTR の解析結果の妥当性を検証するため、同様のモデルを LS-DYNA で解析した場合の荷重履歴も合わせてプロットしている。両者比較すると、初期の押し込み（～1.5mm）でのピークの出方や、ピーク後の推移に良好な一致が見られた。次に、図 30 には、押し込み量 5mm、10mm、20mm、30mm の各タイミングにおける変位分布について、DIC 計測結果、FrontISTR、LS-DYNA のそれぞれで得られた結果を比較している。5mm の初期における変形モードについては FrontISTR、LS-DYNA とともに DIC 計測結果と異なる様子が見られるが、10mm 以降は、FrontISTR、LS-DYNA とともに DIC 計測結果と同様の変形モードを再現していることがわかる。

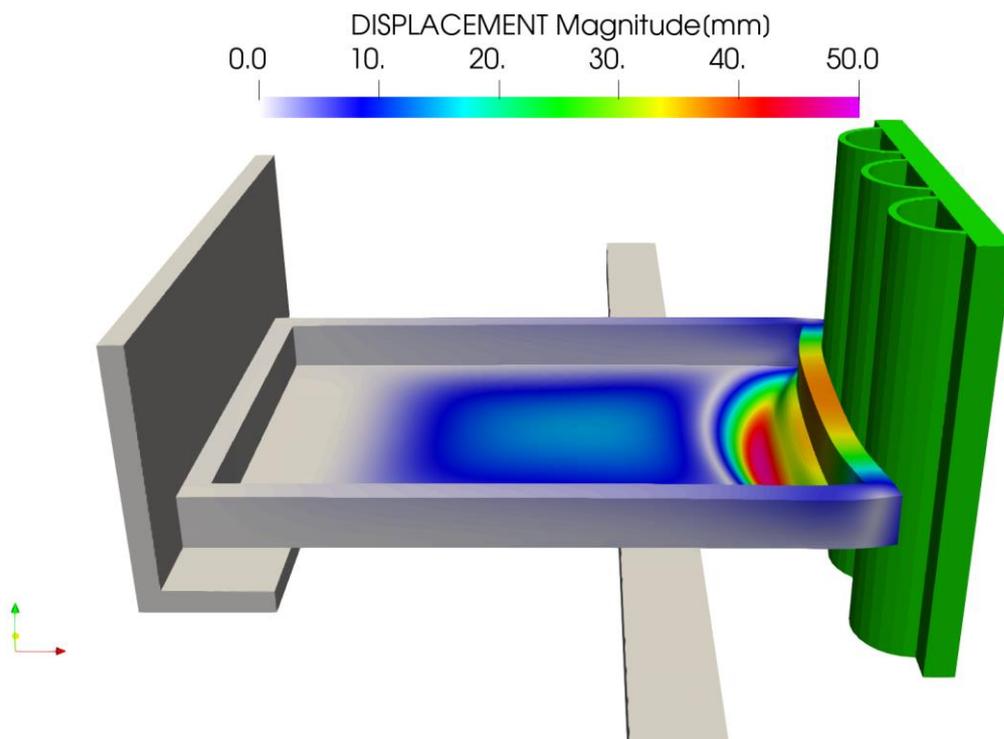


図 28 押し込み量 25mm 時点の変形分布（表示は変形量の絶対値）

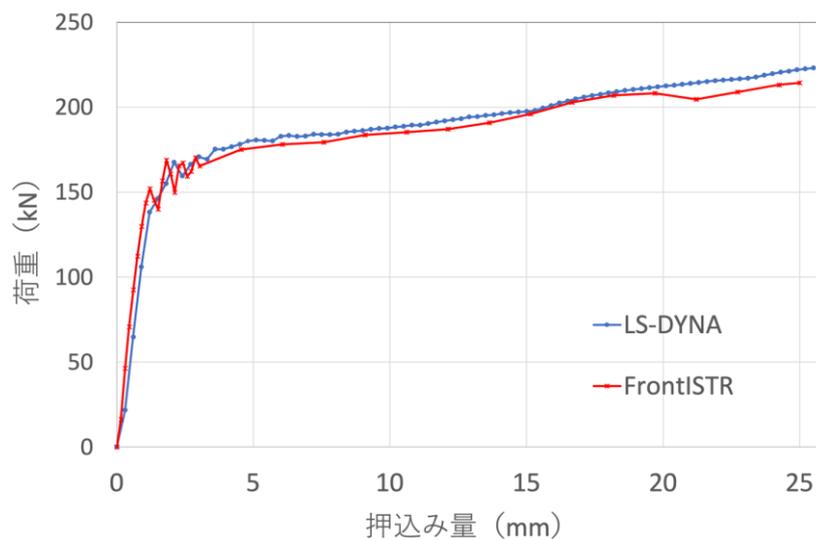


図 29 荷重ストローク

次に、FrontISTR による並列化の効率を調査した結果を図 31 に示す。計測は東京大学情報基盤センターの Oakbridge-CX[1]を利用して行った。時間積分手法に Newmark- $\beta$ 法を採用する FrontISTR では、各タイムステップで接触力を含む力の釣り合いを求める。接触問題の解法として Lagrange 未定乗数法を適用する場合、解くべき連立一次方程式の係数行列は正定値ではない行列となるため、反復解法が適用できない場合が多く、安定した求解を重視する場合は直接解法が適用される。ただし、並列化の観点でみると反復解法のほうが適用しやすさや効率の観点で親和性が高く、FrontISTR では接触問題にお

ける反復解法の適用技術に注力している。今回の計測でも、直接解法の MUMPS を用いる場合と、反復解法の GMRES 法を用いる場合のそれぞれで計算時間を計測した。プロットは 100 タイムステップ（押込量にして 1.5mm に相当）に要した計算時間であり並列数を増やした時の時間短縮効果を比較する。直接解法、反復解法のいずれの場合も並列数を増やすことで計算時間の短縮効果を見ることができ、反復解法の方が高速であり、最大で 896 コアまで時間短縮の効果が確認された。

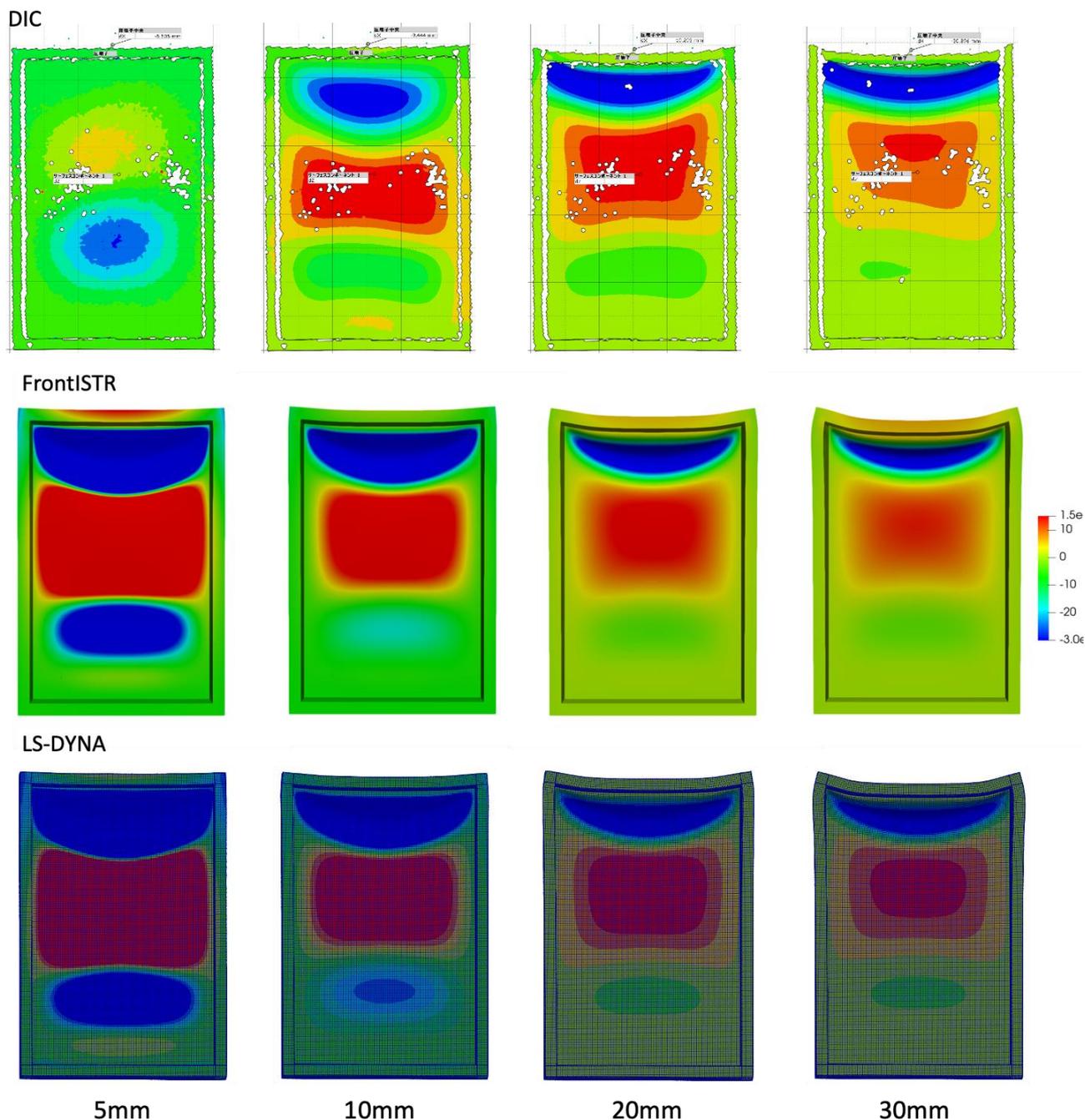


図 30 実機相当形状サンプルにおける  
DIC 計測結果、FrontISTR、商用 CAE コード (LS-DYNA) の比較結果  
(上段：DIC 計測、中段：FrontISTR、下段：LS-DYNA)

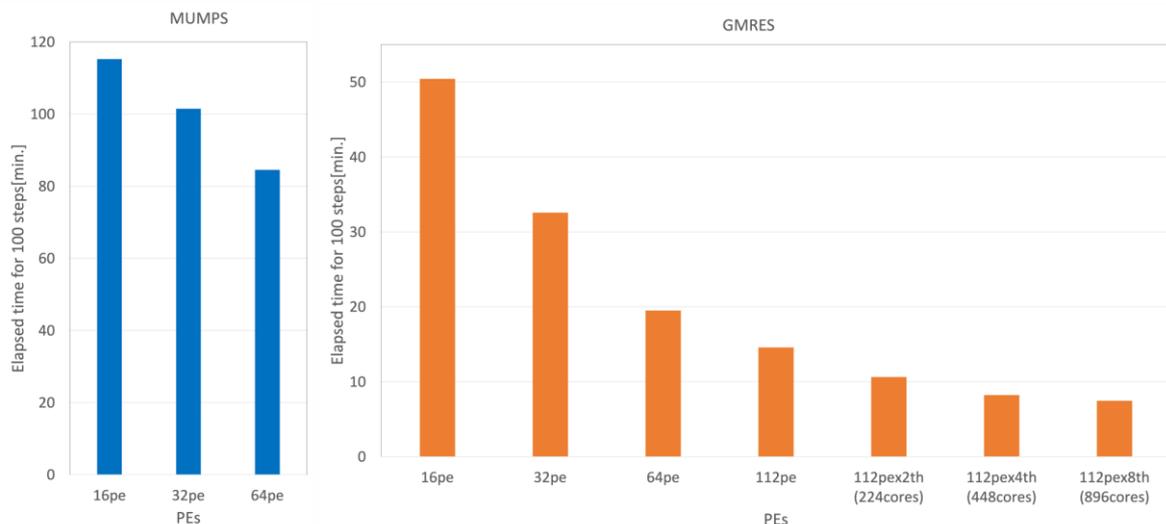


図 31 FrontISTR による並列計算の効果

圧壊試験シミュレーションは、アルミの塑性特性を考慮した変形挙動や、接触による非線形境界の取り扱いなどさまざまな非線形性を有する難しい問題の一つとも言えるが、FrontISTR の適用によって LS-DYNA と比較しても遜色ない解析結果が得られることがわかった。また、これまでに実施してきた産業応用のための研究開発の中で独自に発展してきたソルバー技術により、接触境界を有する場合にも、反復解法による安定した求解が可能であり、圧壊試験シミュレーションでも反復解法による高い並列性能が得られることを確認した。AI 代理モデルの構築にむけた学習データの作成には、多数のパラメータを体系的にサンプリングした多数ケースのシミュレーションの実行が必要であるが、その実行ツールとして FrontISTR が商用ソフトの代替になりうることを期待される。また、大量の計算を実行する計算リソースにクラウド環境を利用する技術[2]と組み合わせることで柔軟性の高い学習データの作成・蓄積が可能となる。

[1] <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/obcx/service/> (accessed 2023-05-25)

[2] 一般社団法人 日本計算工学会 編, 奥田洋司, 稲垣和久, 竹内光秀著, 計算力学レクチャーコース非線形並列有限要素法 FrontISTR の理論・実装・応用, 丸善出版, 2022.

## 2-2-4 内部状態可視化システムの実機相当形状サンプルによる検証

開発した内部状態可視化システムを用いて、実機相当形状サンプル（ver1：板金スポット接合構造＋模擬電池搭載、Ver2：押出フレーム構造＋模擬電池搭載）による検証を実施した。

図 32 に示す実機相当形状サンプル（Ver2）を、内部状態可視化システムにて評価した事例を、図 33 に示す。

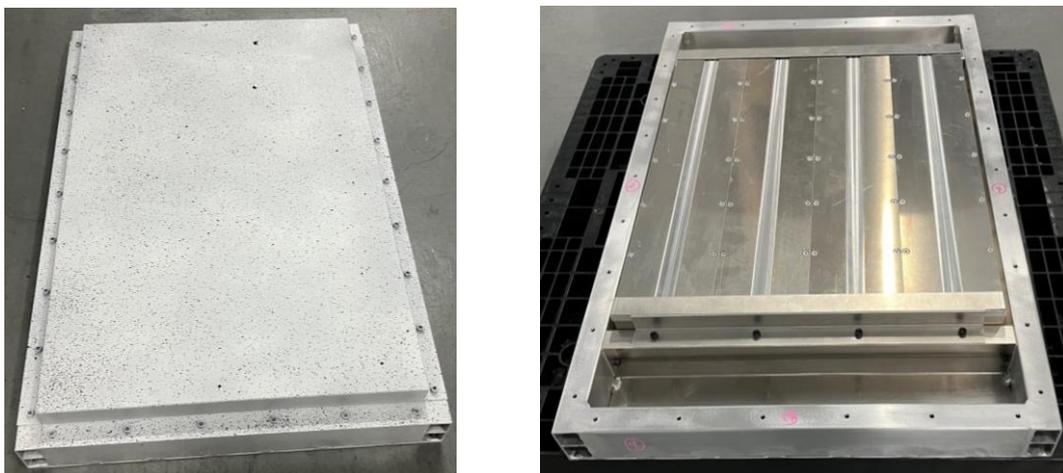


図 32 実機相当形状サンプル（Ver2）  
（左：ふた装着、ランダムパターン塗布後、右：模擬電池装着状態）

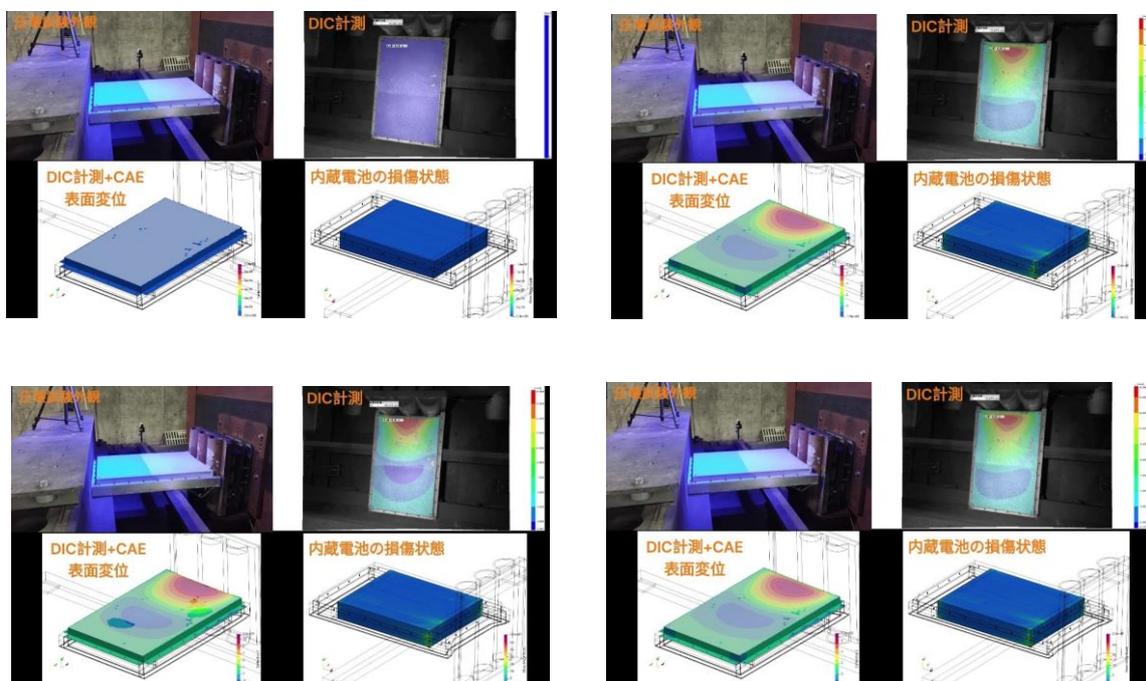


図 33 内部状態可視化システムによる実機相当形状サンプルの評価事例  
（左上：ストローク 0mm、右上：ストローク 30mm、  
左下：ストローク 50mm、右下：ストローク 70mm）

図 33 に示された結果は、圧壊試験を実施中の外観動画（各ストロークにおける、左上図）、ならびに、DIC による表面変位の計測結果（同、右上図）、また、DIC のステレオカメラで取得した表面パッチと圧壊試験シミュレーション結果の重ね合わせ表示（同、左下図）、圧壊試験シミュレーション結果における内部状態表示（同、右下図）を、同じ押し込みストロークで表示したものである。

本研究開発では、DIC 計測結果とシミュレーション結果を座標変換によって重ね合わせて、差分・誤差の演算を行う事で、パラメーターを最適化するフレームワークを開発し、内部状態可視化システムで利用している。図 34 に示すように、開発したフレームワークによって DIC 計測結果とシミュレーション結果がほぼ一致できていることが確認できている。したがって、DIC で計測できないバッテリーパックの内部状態が、シミュレーション結果と統合することで可視化された。

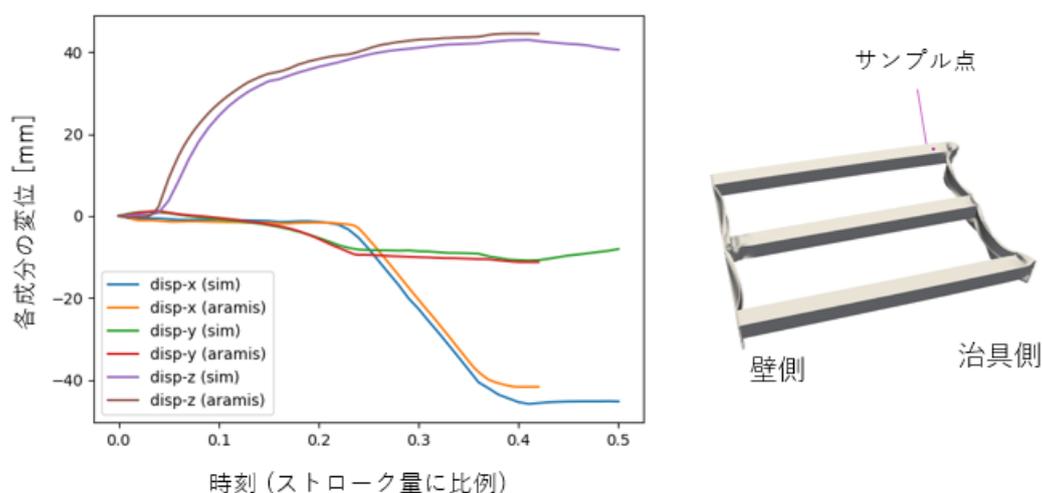


図 34 簡易形状サンプルによる、計測データとシミュレーションの重ね合わせ精度