

NEDO水素・燃料電池成果報告会2022

発表No.A-4

燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業/
水素利用等高度化先端技術開発/
機械学習を用いた高压水素複合容器の最適設計技術に関する理論検討及び実証研究

横山卓矢（SUPWAT）、竹本真一郎（東大生研）
株式会社SUPWAT、東京大学生産技術研究所
2022年7月27日

連絡先：corporate@supwat.com
株式会社SUPWAT

事業概要

1. 期間

開始 : (西暦) 2021年6月

終了 (予定) : (西暦) 2023年3月

2. 最終目標

• 中間目標 (2022 年度末)

- 一般事象データ (材料に関する一般的なデータ) と100 ケース程度の設計パターンに関するメゾスケール有限要素解析の結果から設計を支配する力学応答を自動的に抽出し、最適設計のコアとなる機械学習モデルの構築が完了する。
- 破裂圧力、容器内容積、容器収納寸法、材料種別などの設計要件を入力とし、炭素繊維使用量が最小となる最適設計候補を創出する設計最適化AI を構築し、最適設計候補を 3 例以上提示する。

• 最終目標(参考) (2024 年度末)

- 大規模データベースを入力データする機械学習によるタイプ4 容器の最適設計技術を確立。破壊圧力規準でタイプ4 容器で炭素繊維量を約 3 5 %削減し、0.7 万円/L の目標を達成する

事業概要

3.成果・進捗概要

- 国内外の容器設計データから積層構成を自動的に変更し、さらに有限要素解析結果から設計を支配する力学応答を自動的に抽出し機械学習データを大量に蓄積するプログラムの開発が完了
- 上記大量のデータから破裂規準となるCFRP層の最大繊維方向ひずみを予測する機械学習モデルの開発が完了。精度向上施策を打ちつつ、軽量かつ破裂規準を満たすパレート最適化を導出するアルゴリズムを開発中
- 製造時の不確定変動要因に対しロバスト性の高い容器最適設計への拡張のため、主要因と考えられる製造欠陥であるボイドの生産品での発生状況を調査。得られたボイドの特徴量（位置、大きさなど）をもとに、ボイドによる容器破壊強度低下メカニズム解明のためのCFRPメゾスケール解析に着手。

1. 事業の位置付け・必要性

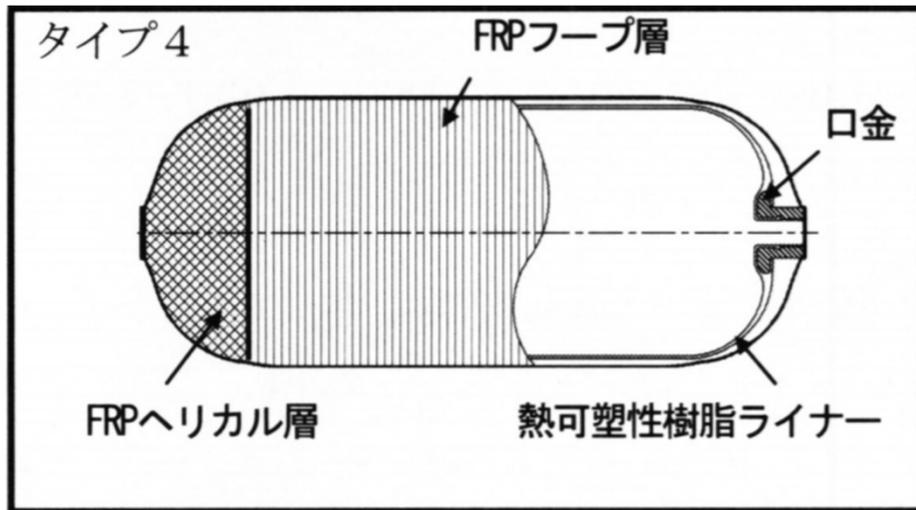
- CFRP製タイプ4容器は設計パラメータが多数存在し、かつ破裂強度は製造欠陥の影響も大きい。
- それらを統合的に取り扱う手段の開発が急務であり、解決策のひとつが大量データの利活用である。

	現状	将来
設計手法	<ul style="list-style-type: none">• CFRPを用いることから設計パラメータが多数• ボイドなどの製造欠陥も破裂強度に影響あり• それらを考慮しながら試行錯誤的に開発	<ul style="list-style-type: none">• 大量の設計データ等を有するデータベースを構築• AI/機械学習による設計候補導出
メーカー	<ul style="list-style-type: none">• 資金力・開発力のある大手自動車タンクメーカーのみ	<ul style="list-style-type: none">• 中堅・中小企業でも製造可能に
対象	<ul style="list-style-type: none">• 一般車両のみ	<ul style="list-style-type: none">• 一般車両に加え、高負荷となる大型商用車（HDV）への展開も視野に入れる

開発の対象

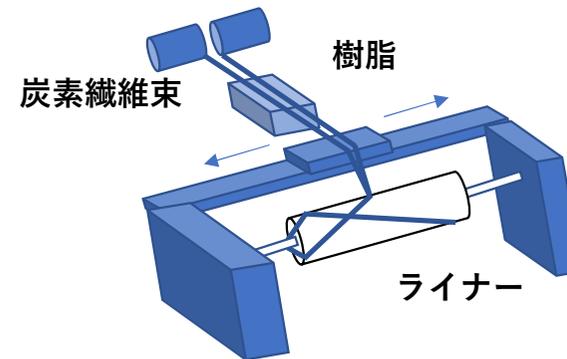
1. 事業の位置付け・必要性

タンク設計パラメータの例



- 口金の寸法および容器全体の寸法（形状）
- ライナー樹脂、熱硬化性CFRP樹脂および炭素繊維に関する機械特性を中心とした各種材料物性
- 炭素繊維体積含有率
- 炭素繊維束の寸法
- フィラメントワインディングのCFRP積層構成

製造ばらつきの例



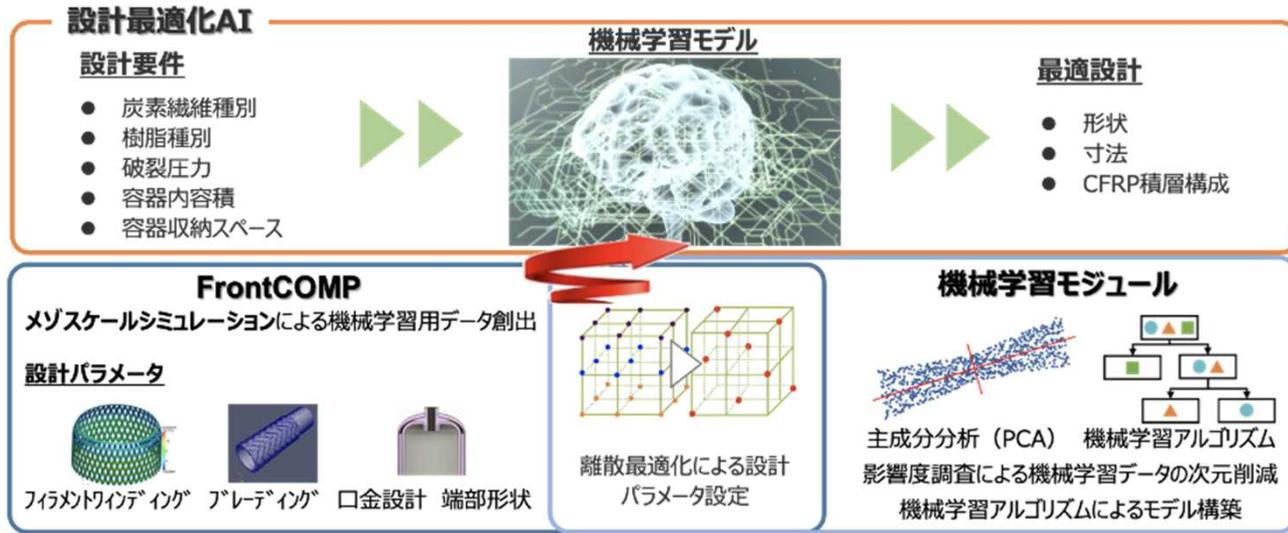
FW（フィラメントワインディング）工程 → 熱硬化工程

- 製造欠陥（ボイド）
→ 破裂強度低下の主要因と推定し、ボイドに対しロバスト性の高い設計パラメータを探索
 - 炭素繊維、樹脂物性ばらつき
 - 炭素繊維体積含有率ばらつき
 - 繊維の扱れ、交差角ばらつき
 - 残留応力、樹脂硬化ばらつき
- } 下限値で設計
} 寄与小

1. 事業の位置付け・必要性

- 国内外メーカーのタンク設計データを大量に蓄積、AIによる最適設計導出プラットフォームを構築。
- ユーザーとなるメーカーの開発工数を飛躍的に削減し、タンク開発ノウハウを広く普及

設計最適化プラットフォーム



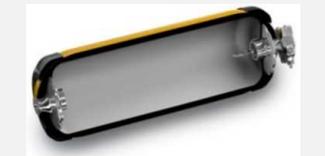
国内外メーカーの**設計データ100万件以上**を蓄積

ユーザー

← アクセス



→ 設計候補



2. 研究開発マネジメントについて

・現在の開発目標が設定された背景

2025年頃にFCVをHV並の価格競争力へ価格差低減とする水素・燃料電池戦略ロードマップをもとに、本事業期間で実現可能な目標を設定

(参考：水素貯蔵システム 約70万円→30万円)

・ベンチマーク（国内外）結果との比較

上市実績のある新型トヨタMIRAI比で、より軽量なタンク設計を導出することを目標とする

・産業界等のニーズ対して、研究開発目標レベルが妥当かどうか

形状やタンク個数なども考慮に入れた自由度の高い設計や、大型車両や産業車両さらには鉄道やドローンなどに搭載するより多様な容量と耐圧性能の要求に応える最適容器設計システムがマーケットニーズとして存在する。

それらに加え、今後は国内の多くの事業者が高压水素容器の開発に参入しやすくするため、最適設計技術の汎用化が求められている。

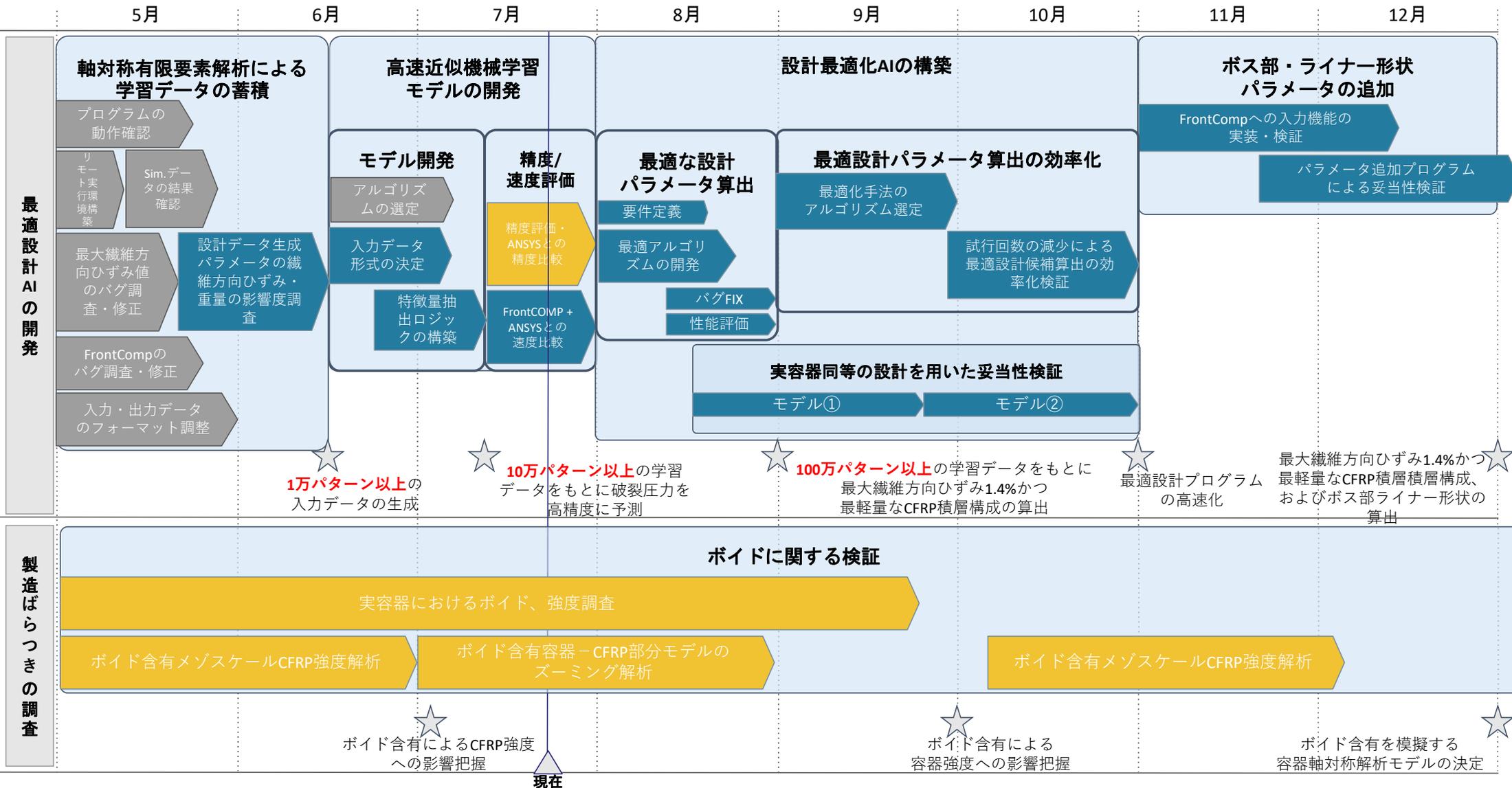


図. 大型商用車向け高压水素容器の概念図

2. 研究開発マネジメントについて

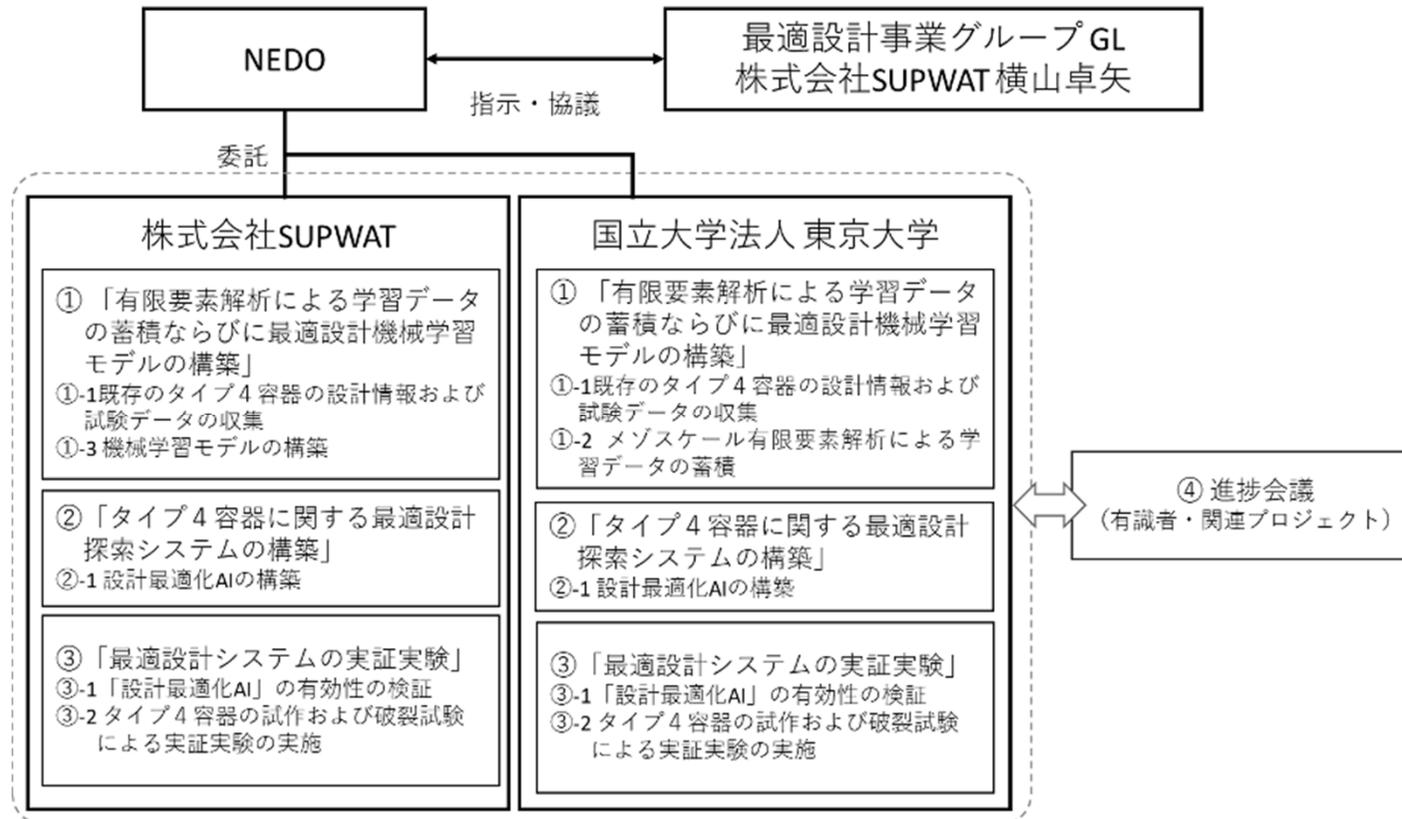
予定

完了



2. 研究開発マネジメントについて

- 研究開発の実施体制



- 知的財産戦略に関する独自の取り組み

AI/機械学習に供した入力データ、および設計候補として導出された出力データに関する知財戦略を策定中

3. 研究開発成果について

研究開発の目標及び進捗状況、目標達成に向けたアプローチ

研究開発テーマ	中間目標	達成度	成果・状況
①有限要素解析による学習データの蓄積ならびに最適設計機械学習モデルの構築	有限要素解析結果から設計を支配する力学応答を自動的に抽出し機械学習データを生成するスキームを確立	○	全収集データについてFEモデルの作成が完了。またそれらをベースに大量のFEモデルを生成し有限要素解析を実施し機械学習の入力データとして蓄積。
②タイプ4容器に関する最適設計探索システムの構築	炭素繊維使用量が最小となる最適設計候補を創出する設計最適化AIを構築。最適設計候補を3例以上提示	○	1万件の有限要素解析結果をもとに、破裂圧力の予測モデルを開発完了。現在精度向上をトライ中。 並行して有限要素解析モデルにボイドに代表される製造欠陥の影響を組み込むため、実容器のボイドデータおよび製造条件のばらつきデータを入手し、モデル化の手法を検討中
③最適設計システムの実証実験	(継続時に実施予定)	-	(継続時に実施予定)
(参考) ④進捗会議	4か月に1度開催	○	有識者および関連プロジェクトに進捗を報告するもの。他研究開発Grとの連携会議を既に4回実施

3. 研究開発成果について

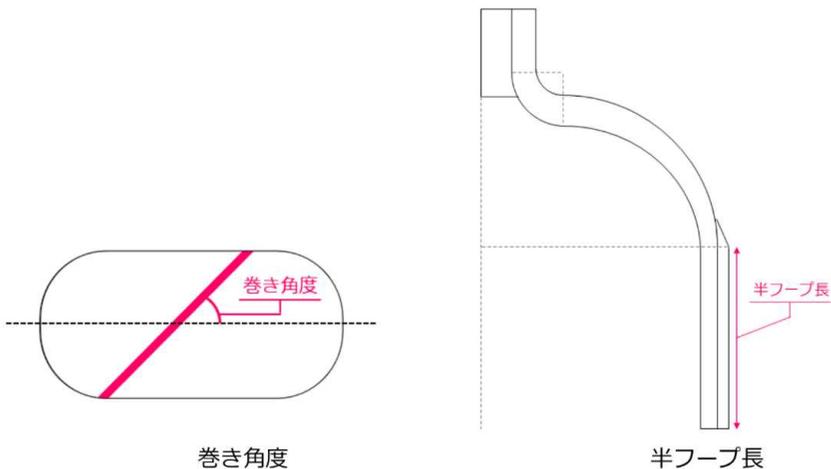
- 積層構成パラメータをランダムに変更し、FEモデル生成→解析が可能なプログラムを開発完了
- 大量の有限要素解析結果を収集し、設計や力学応答の傾向を確認

FEモデル生成条件

□ 各パラメータを以下の範囲でランダムに設定しモデル生成

- 層数：22-32
- 巻き方：ヘリカル or フープ
- 生成確率：[ヘリカル：フープ=2：1]
- 巻き角度（ヘリカル層のみ設定）：10.0-80.0
- 半フープ長（フープ層のみ設定）：300.0-320.0

▶ 合計215個のFEモデルを生成



有限要素解析結果

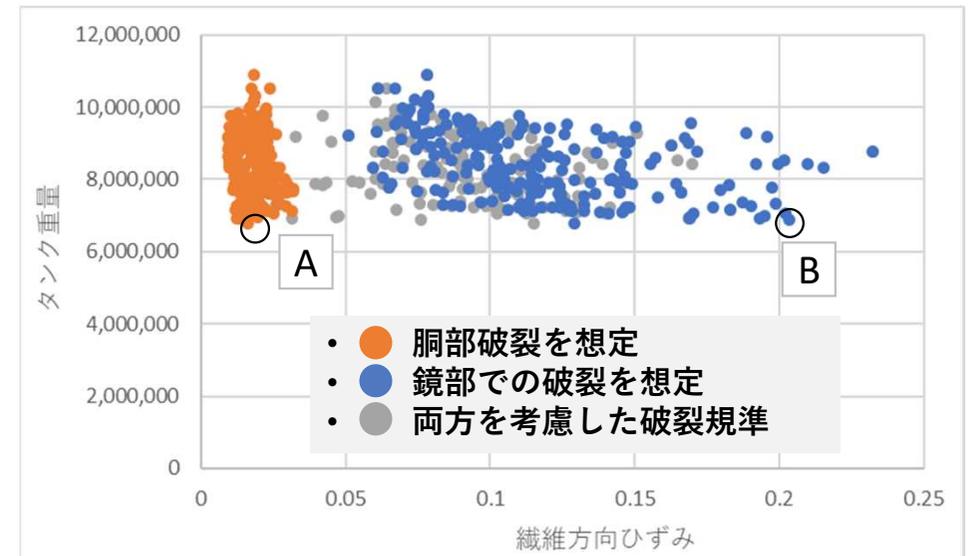


図. 繊維方向ひずみ,タンク重量関係

3. 研究開発成果について

- 有限要素解析結果を学習データとし、繊維方向最大ひずみを予測する機械学習モデルの構築が完了
- 複数の破壊規準を満足しながら、高精度に最適解を導出するアルゴリズムを開発中

機械学習の分析結果



- モデルA
 - 決定係数：0.381
 - MAE：0.0217
- モデルB
 - 決定係数：0.420
 - MAE：0.00300
- モデルC
 - 決定係数：0.0926
 - MAE：0.0218

**精度向上のため
データを大量に追加予定**

最適解の導出（開発中）

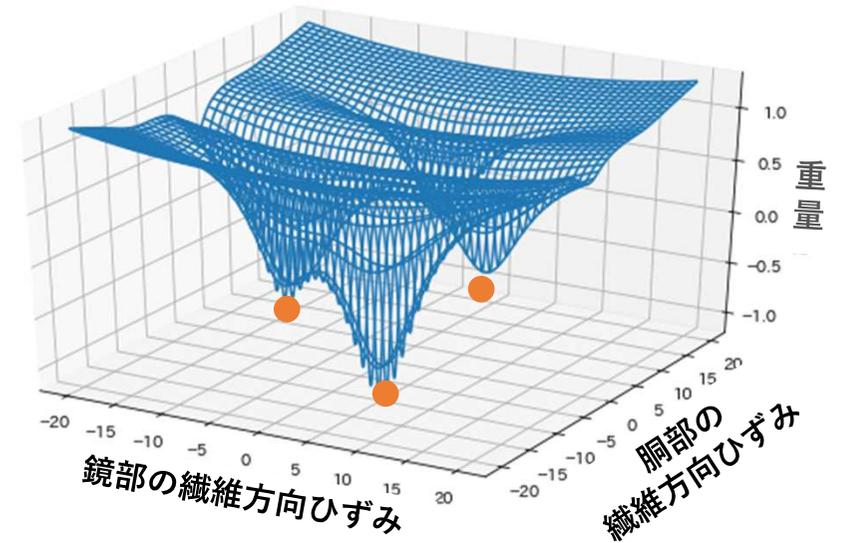


図. 求める解空間の例

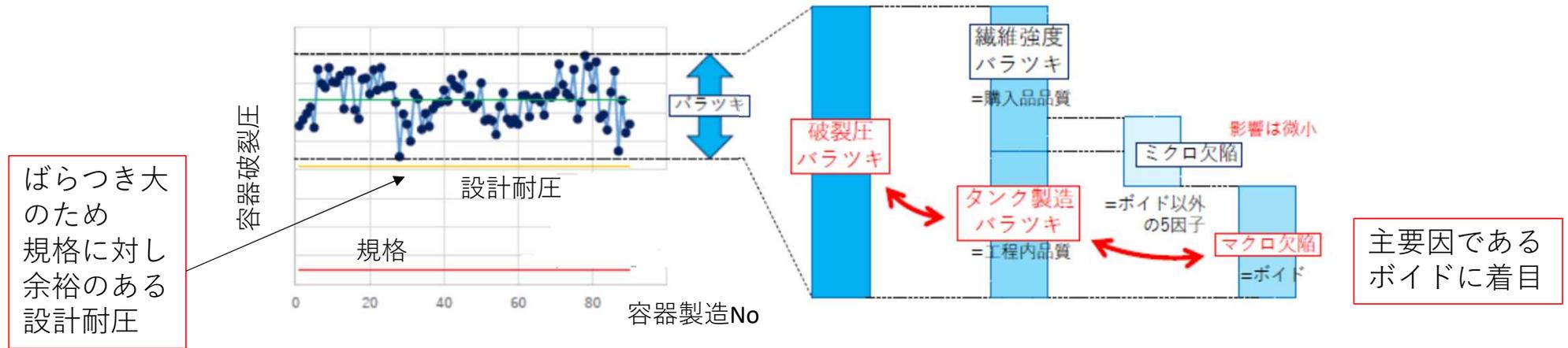
▶ **設計には複数のCriteriaを満足することが不可欠**

- 破裂関連
 - 破裂圧
 - 破裂部位
- 設計
 - 積層構成
 - 重量
- ... etc.

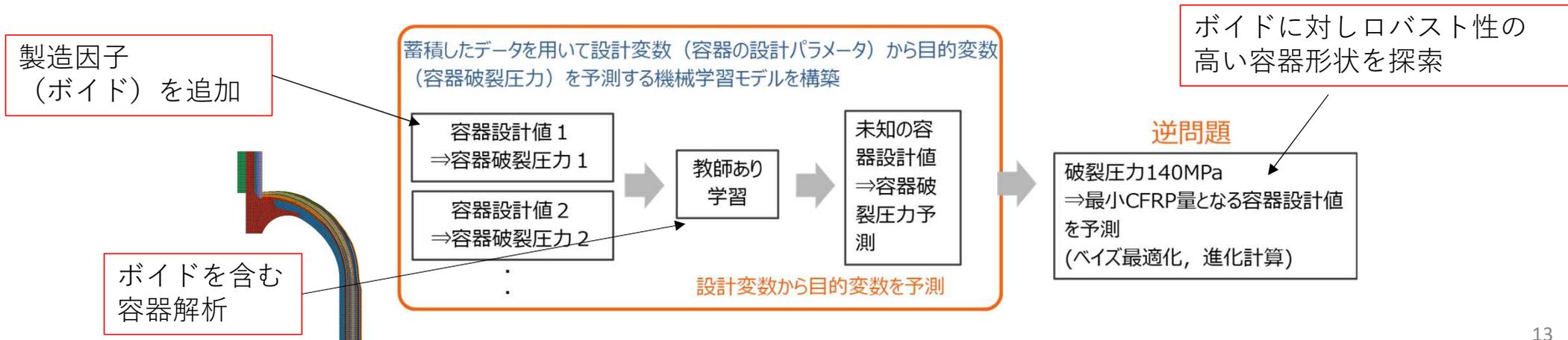
3. 研究開発成果について

- ・ 製造時の不確定変動要因（ボイド）に対するロバスト性の高い容器最適設計探索システムへの拡張

■ 容器製造ばらつきとその要因（A社容器分析結果）



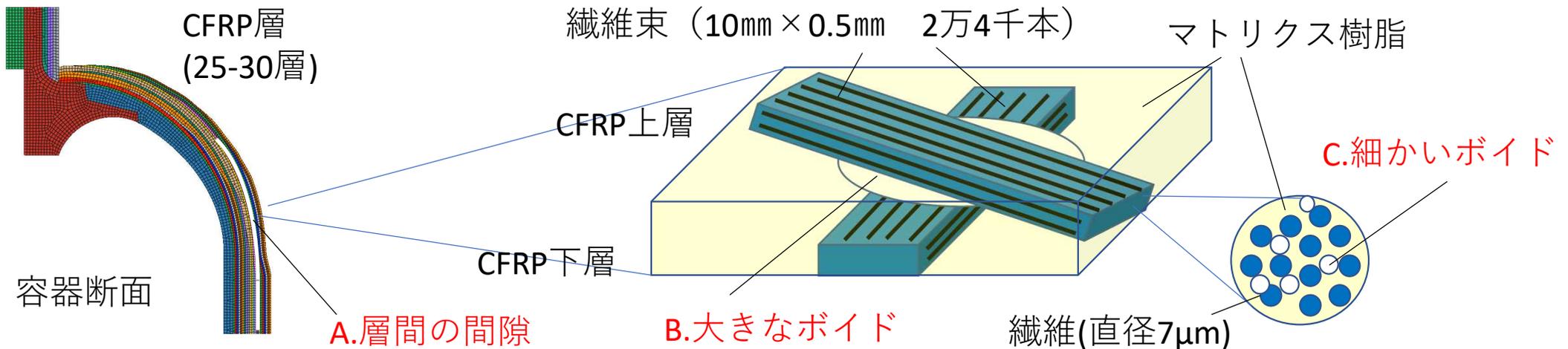
■ 容器最適設計探索システムの拡張



3. 研究開発成果について

■ ボイドによる容器破裂強度低下メカニズムの仮説

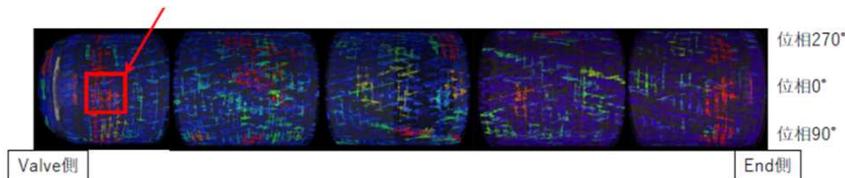
容器CFRP層ボイド形態		破壊モードの仮説
1. 初期品	A. 層間の間隙	下層側の荷重分担増→下層側ひずみ大→容器破裂
	B. 層間の大きなボイド (空隙 mmレベル)	繊維束の保持力（張力）低下→繊維強度低下→容器破裂
	C. 層内の細かいボイド (気泡 μmレベル)	マトリクス樹脂物性低下→繊維直交方向強度低下→容器破裂
2. 繰り返し負荷後	大きなボイドが間隙に成長	Aと同様
	細かいボイドが大きなボイドに成長	Bと同様



3. 研究開発成果について

■A社容器生産品ボイド調査結果

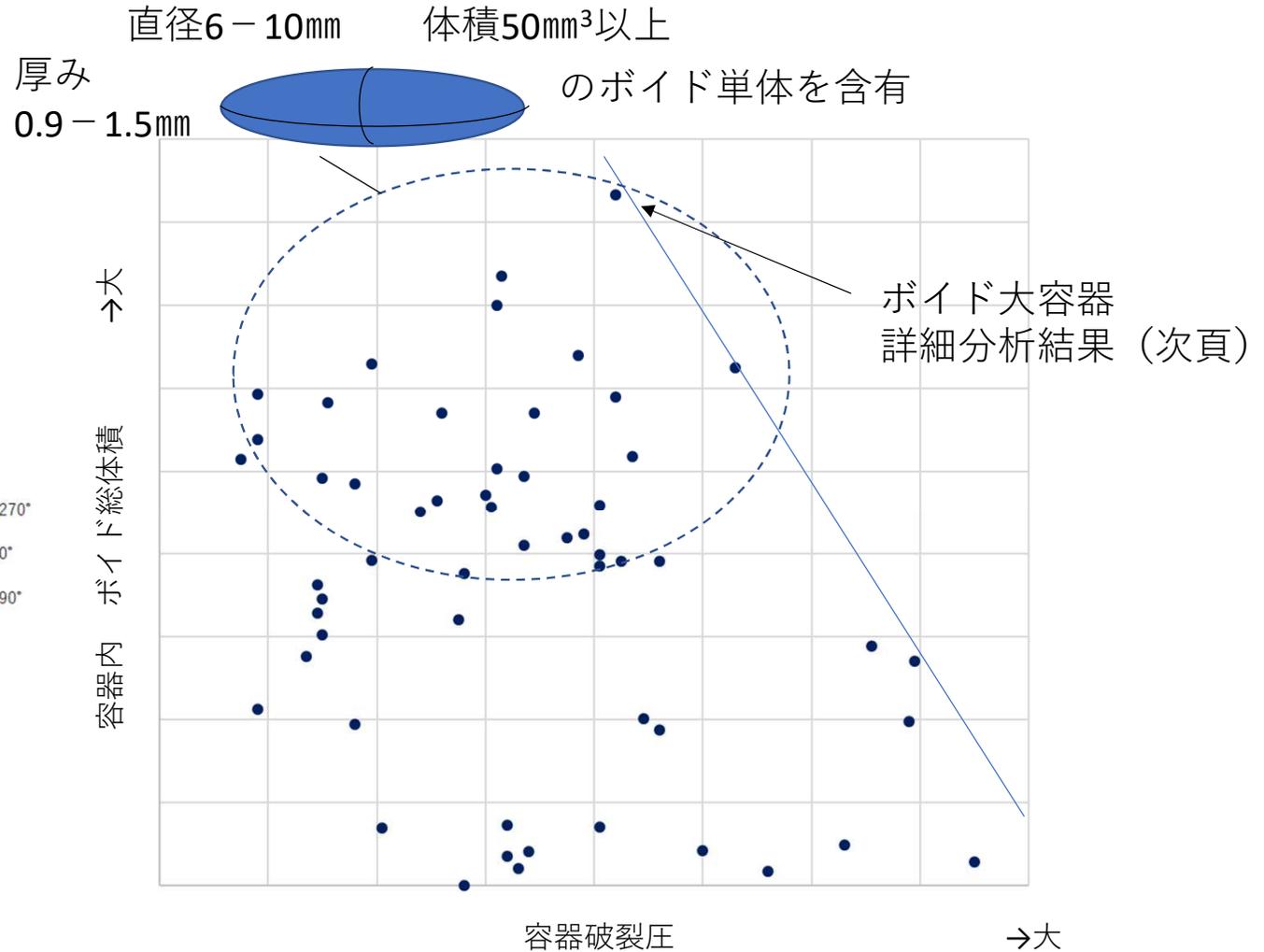
- ・ボイドが少ない容器は破裂圧大
- ・ボイド総体積大の容器はmmレベルの体積大のボイド単体を多く含有
- ・ボイド含有率はボイド大容器でマトリクス樹脂の2%程度



X線CTスキャンによるボイド大きさ計測



容器破裂試験

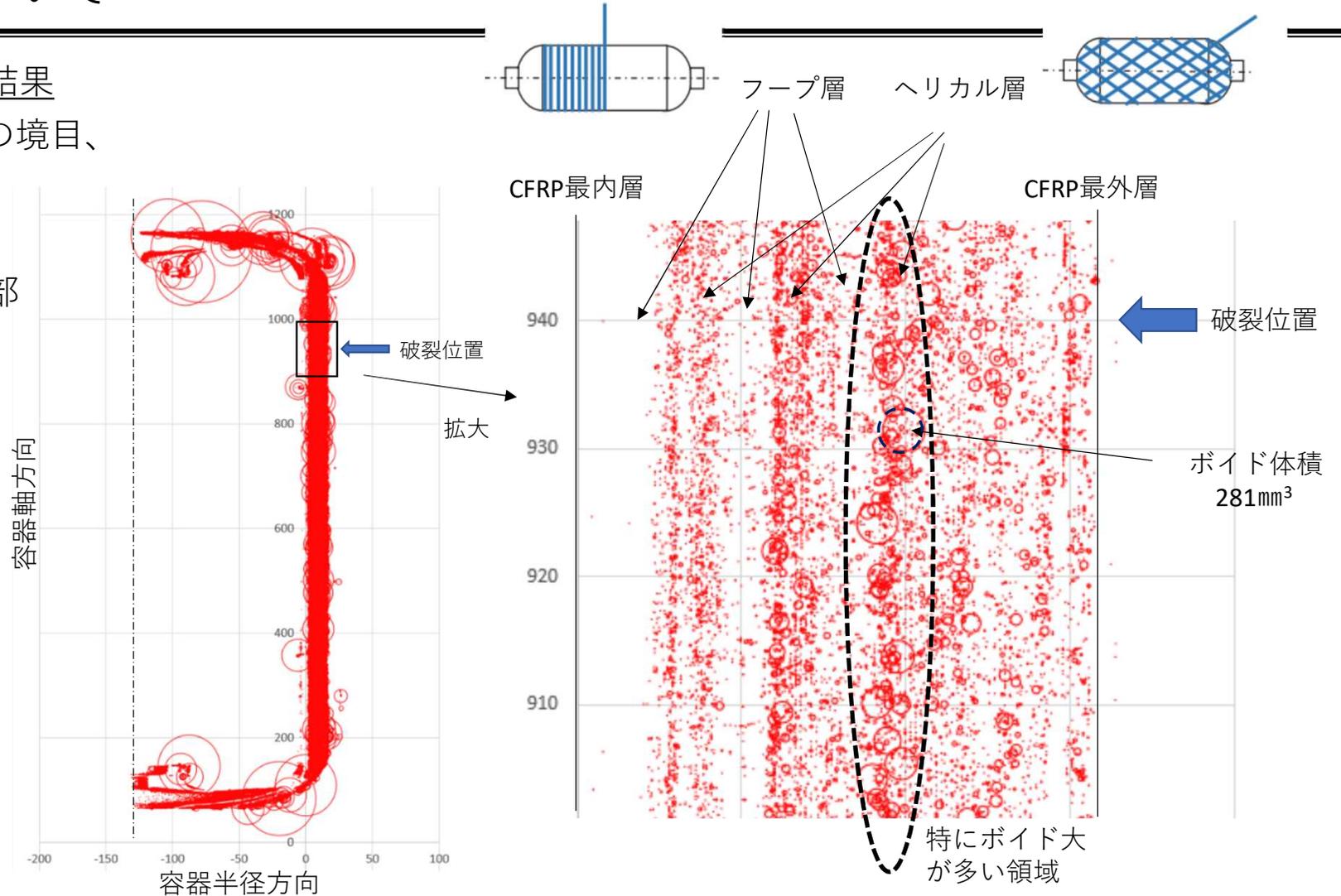


破裂位置近傍部のボイド体積－容器破裂圧 (容器57台)

3. 研究開発成果について

■ ボイド大容器 詳細調査結果

- ・ フープ層とヘリカル層の境目、特に中間層にボイド大が多数が存在
- ・ 破裂位置近傍である肩部にもボイド大が存在

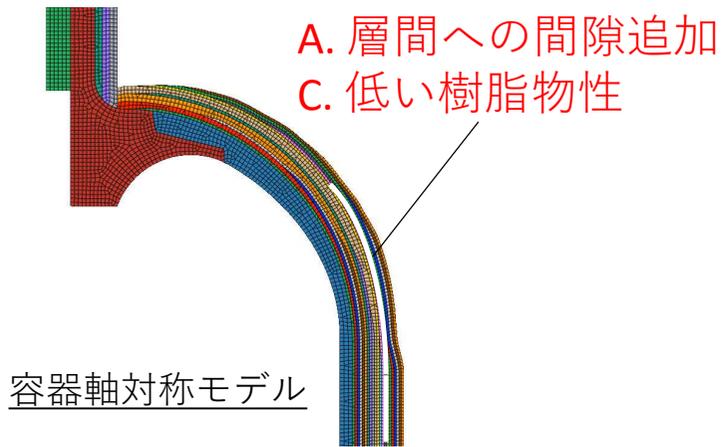


ボイド大容器CFRP積層部のボイド分布調査結果 (ボイド体積をバブルチャートで表示)

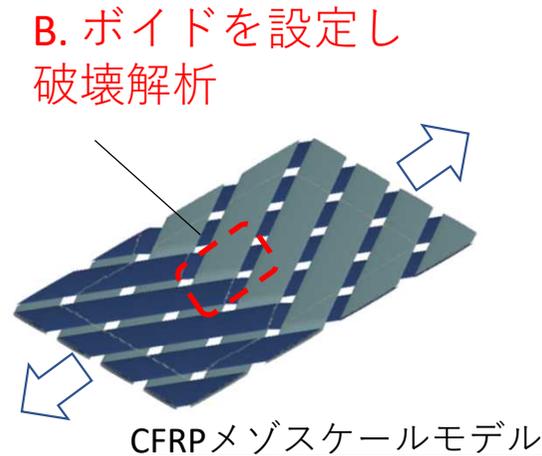
3. 研究開発成果について

■ ボイドによる容器破裂強度低下メカニズム解明と機械学習データ用モデル解析

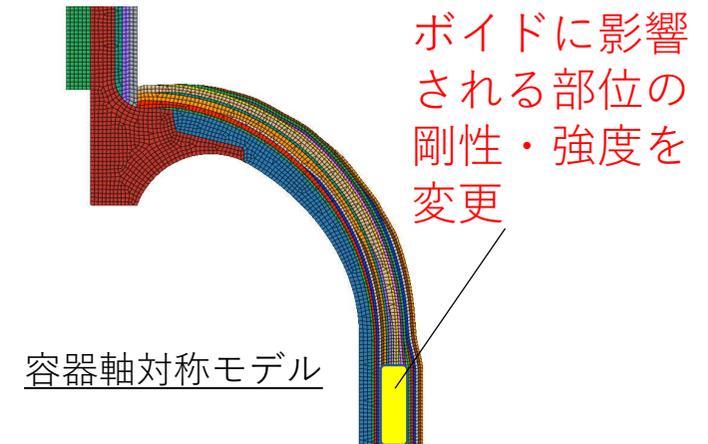
容器CFRP層ボイド形態	解析方法
A. 層間の間隙	容器軸対称モデル解析：CFRP層に間隙追加（層厚の2%程度）
B. 層間の大きなボイド	CFRPメゾスケール解析 → 容器軸対称モデル解析：ボイドに影響される部位の剛性・強度を変更 (1)交差角の大きく異なる層間 (2)鏡部・肩部（曲げ付加） (3)破裂位置近傍 (4)中間層（面外方向を拘束）
C. 層内の細かいボイド	容器軸対称モデル解析：低い樹脂物性折込（2%低下）



A,C 解析案

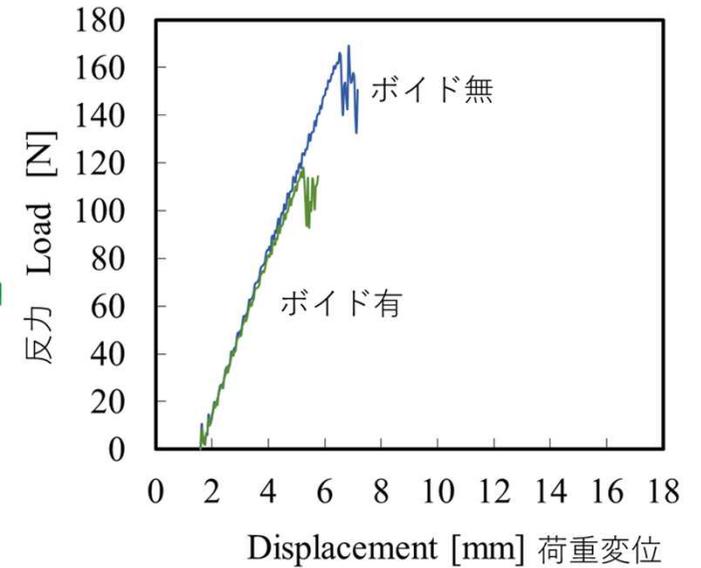
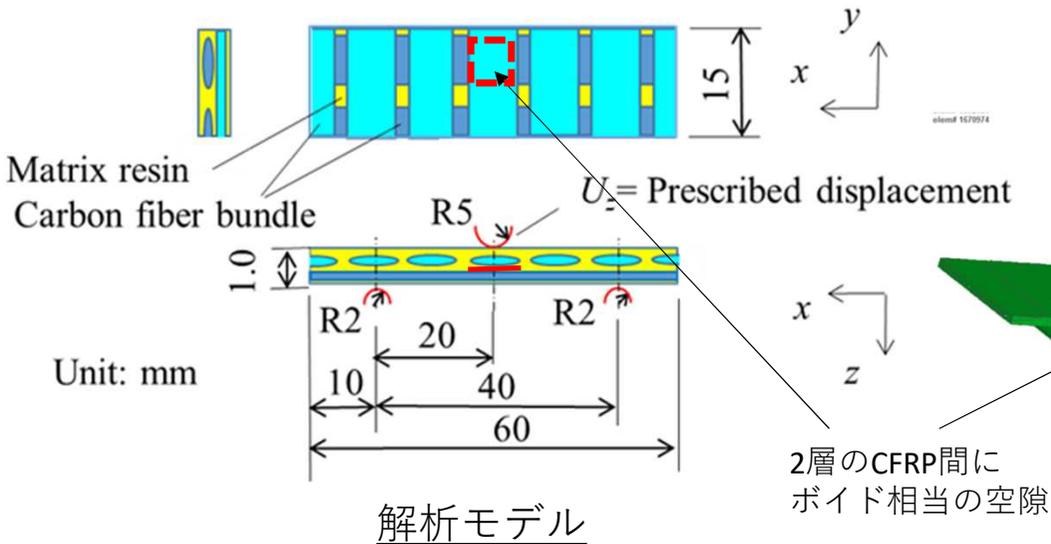


B 解析案



3. 研究開発成果について

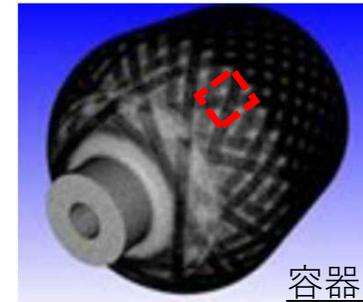
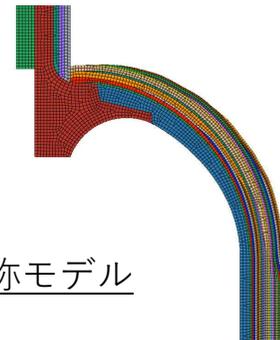
(2) 鏡部・肩部（曲げ付加）を想定したモデル
ボイド有で破壊強度低下



解析結果

→容器での荷重モード（曲げ）とボイドによる
剛性・強度低下の複合の強度モデルを検討

容器軸対称モデル



容器メゾスケールモデル

4. 今後の見通しについて

- **実用化・事業化のイメージ（成果がどのように使われるか）**
 - タンク設計データ100万件以上を蓄積したデータベースをもとにAI/機械学習による最適設計候補の導出が可能なプラットフォームを開発・提供
 - サブスクリプション型によるメーカー各社へのアカウント発行とし、タンク販売価格10数万円/個のうち数%程度をレベニューシェアすることで売上創出を図る。
- **実用化・事業化に対する今後の課題と対応方針**
 - 本開発項目の事業化においては、データの保有・蓄積数が極めて肝要
 - まずは自動車OEMと連携し実用に耐えうるモデルを開発中
 - その他に国内外新興容器メーカーとの情報交換を実施中
- **その他、顕著な経済・技術・社会的な効果、人材育成の取り組み等**
 - タンク開発工数短縮によるHCVの低価格化や技術転用による参入メーカーの増加
 - HDVを含めた他モビリティへの展開による上市速度向上
 - 極低温における樹脂の機械特性評価などを通じ、航空宇宙を含む他産業への事業多角化

EoF