

令和3年(第21回)海上技術安全研究所研究発表会

変形時の特性を考慮した新しいFRPの 強度評価・設計技術



構造安全評価系
松尾 剛



Contents

1. 繊維強化複合材料 (FRP) に求められること
2. フィラメント・ワインディング (FW) 製タンクの強度評価法
 - I. 湾曲構造の強度試験・評価法の提案
 - II. 結果と考察
3. 層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション
 - I. 材料モデルの提案
 - II. 結果と考察
4. まとめ

新しい材料研究に求められること

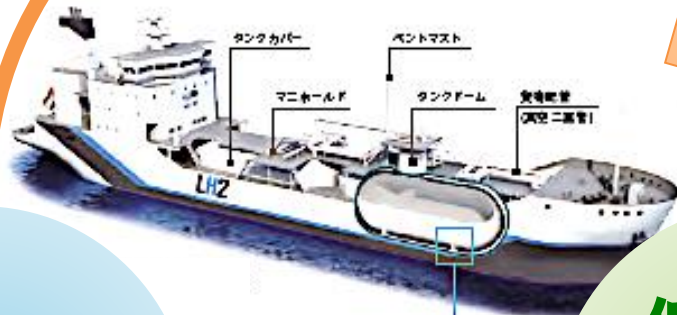
3つの要素と...

高機能

“快適性・利便性”

全体をみる
システム設計

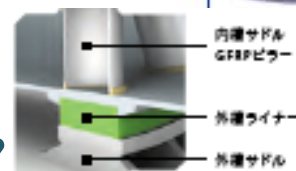
例「すいそ ふろんていあ」



信頼性

“安全性・耐久性”

**低コスト・
低エネルギー**
“環境適合性”



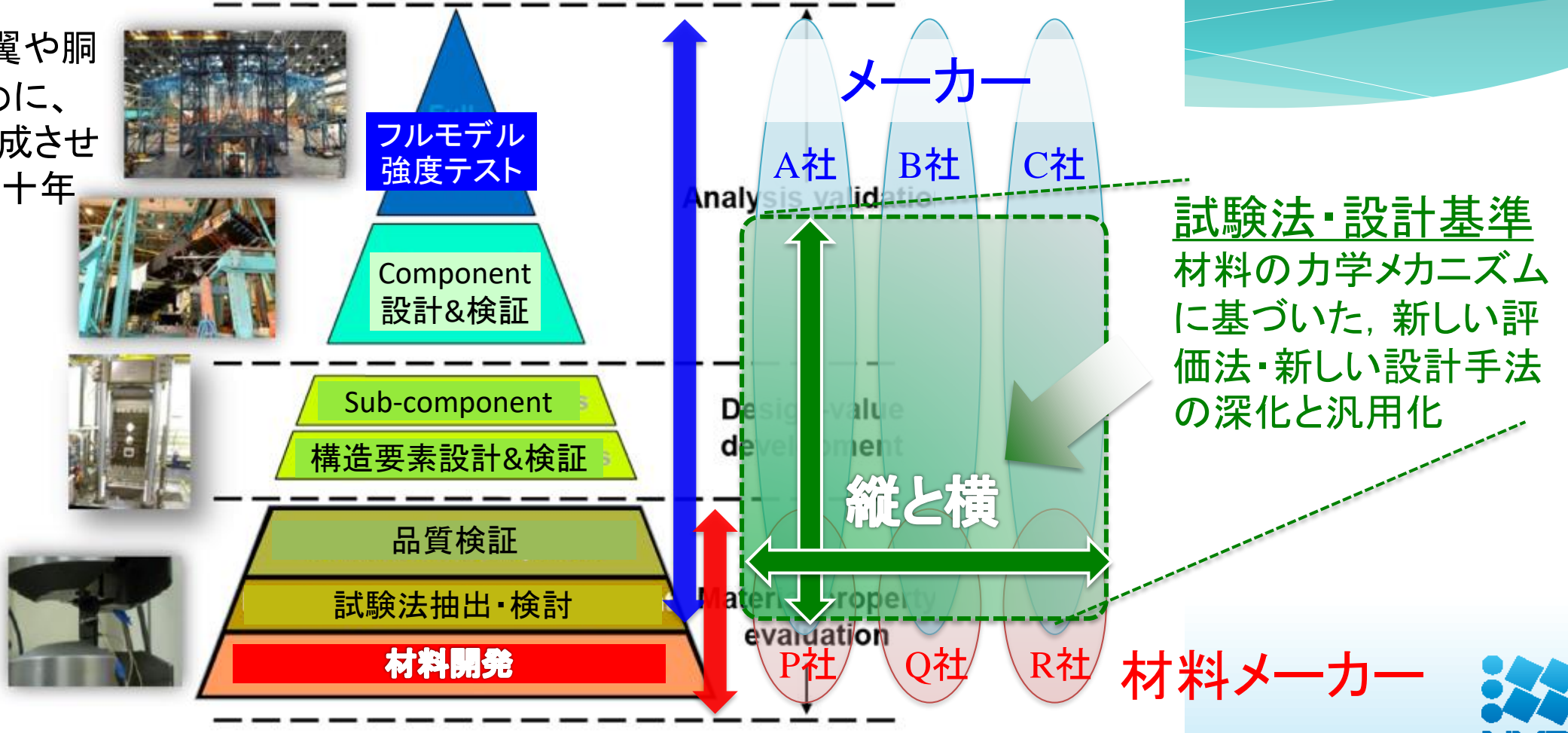
液化水素タンク

どれか一つが良くても、他が満足されないと実用化できない
“もの”の仕組みを広い視野で見る必要がある

材料特性評価と信頼性設計の基準創り

信頼性設計開発ビルディングブロック

航空機がCFRPを翼や胴体に適用するために、このプロセスを完成させるのにもやはり数十年かかった
Ex) Boeing 787



Contents

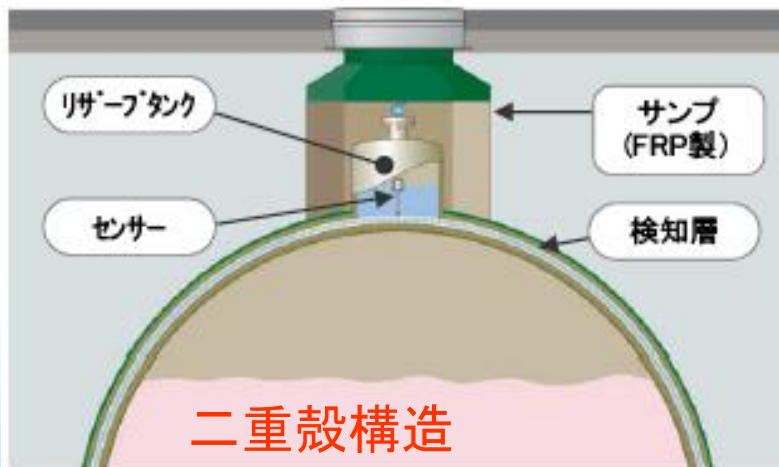
1. 繊維強化複合材料 (FRP) に求められること
2. フィラメント・ワインディング (FW) 製タンクの強度評価法
 - I. 湾曲構造の強度試験・評価法の提案
 - II. 結果と考察
3. 層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション
 - I. 材料モデルの提案
 - II. 結果と考察
4. まとめ

FW製タンクの強度評価法 - 二重殻タンクの安全機能 -



【異常検知構造】

リザーブタンクと一体式の検知層がタンク全周にあり、内部に充填された検知液の液面変化で異常を瞬時に検出



正常時

リザーブタンクの検知液はタンクの検知層とつながり正常時は標準レベルで静定している。

異常発生時

漏洩時はリザーブタンク内液面レベルの上下動をフロートセンサーが検知し、瞬時に表示器に異常表示

- 米国では二重構造が義務付けられている(1998年以降)
- 我が国でも漏洩防止対策の必要性が高まってきているが二重殻タンクの普及率は20%程度(平成28年度)

軽量
作業性UP

耐久性・耐食性
長期運用によるコストダウン

安全対策
漏洩検知機能

FW製タンクの強度評価法

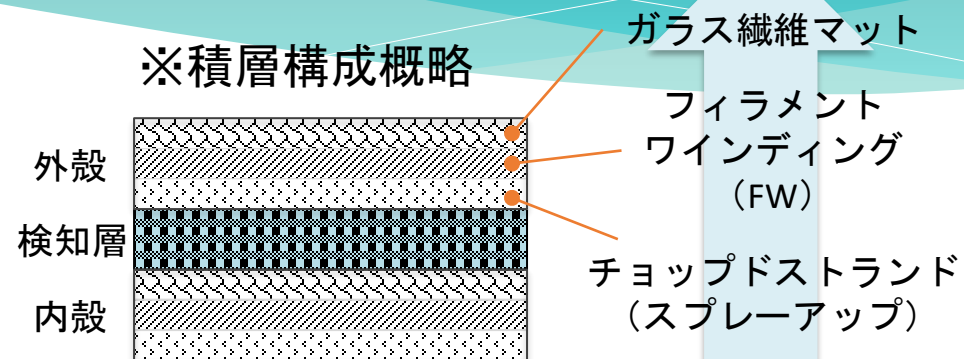
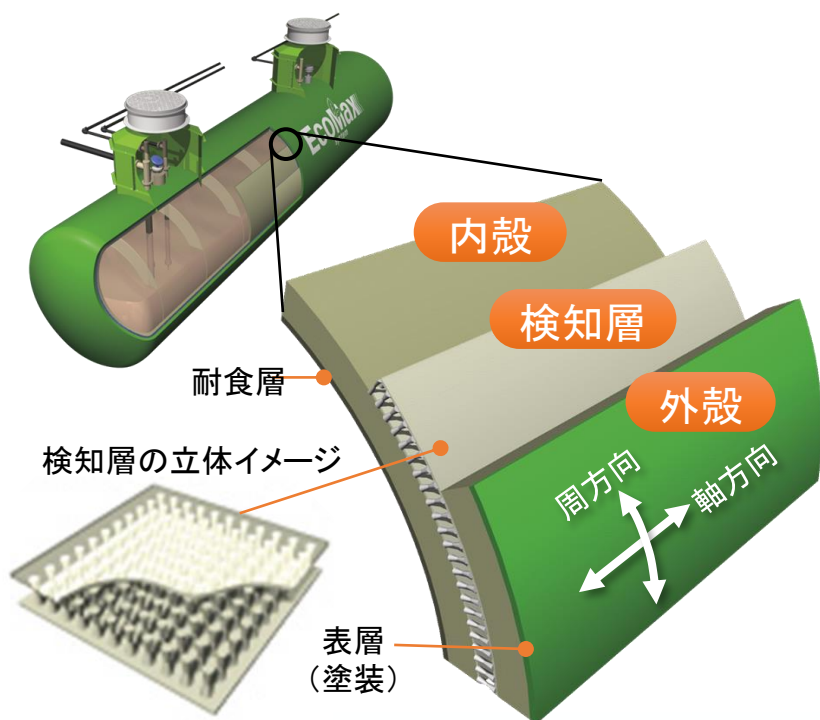
- FF二重殻タンクの特長 -

		一重殻タンク	SF二重殻タンク	FF二重殻タンク
タンク構成		外面防食塗覆装  スチール板のみ	外殻:FRP板  内殻:スチール板	外殻:FRP板  内殻:FRP板
重量 ex. 内径2400mm, 長さ12000mm		約6.5 トン	約6.5 トン	約3.3 トン
耐食性 サビや腐食		腐食する	腐食する	腐食無し
価格	本体	安い	高め	高め
	埋設工事	高い コンクリートピット	安め 直埋設可能	安め 直埋設可能
漏洩防止	定期検査	必要	内殻:不要 外殻:必要	常時モニタリングにより 不要
	検知機能	なし	 検知管 センサ 内殻破損時のみ検知可能	 センサ 検知液 内殻・外殻のどちらが破損しても検知可能

FW製タンクの強度評価法

- FF二重殻タンクの構造・製造 -

FF二重殻タンクの開発例

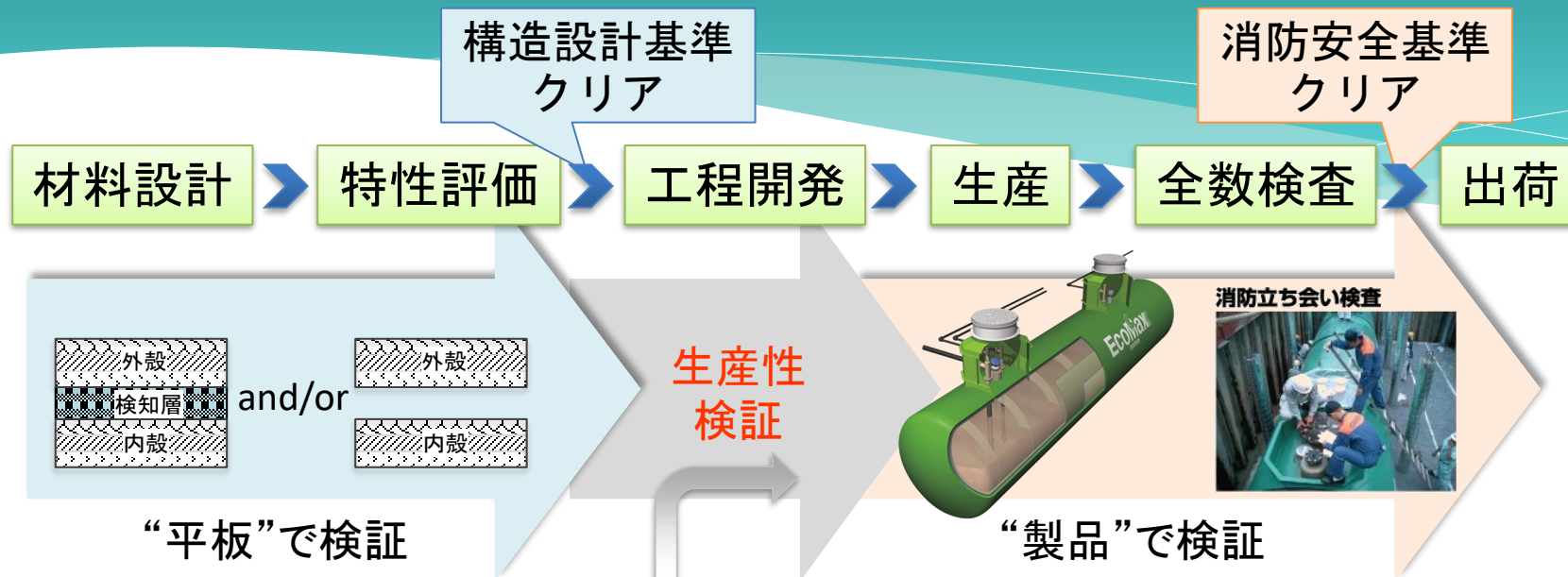


内殻側から下から順に積み上げ
連続的に一体成形

三次元織物構造 (検知層) が内殻と
外殻の距離を一定に保ち支えるため、
十分な検知空間を確保できる

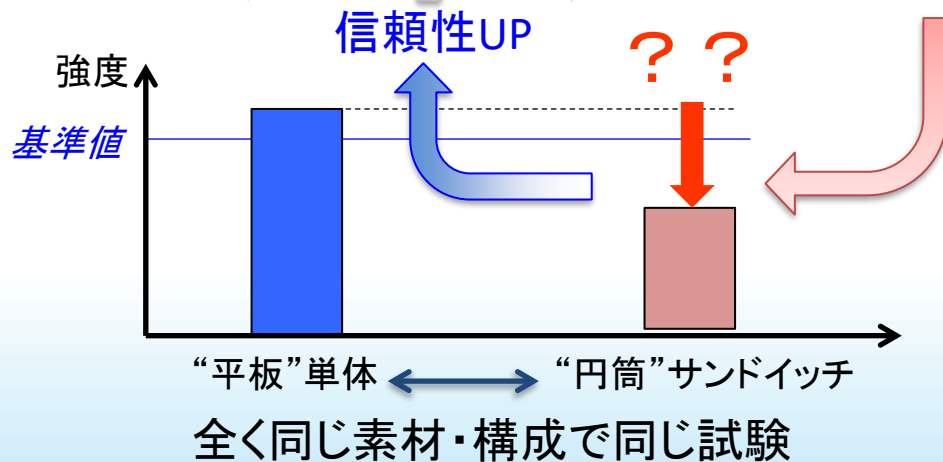
軽いだけでなく、二重殻構造の利点を最大活用した機能を持つ

FW製タンクの強度評価法 - 評価基準の問題点 -



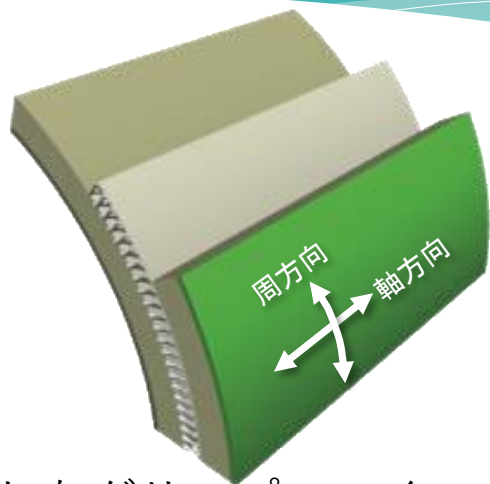
“平板”で検証

“製品”で検証

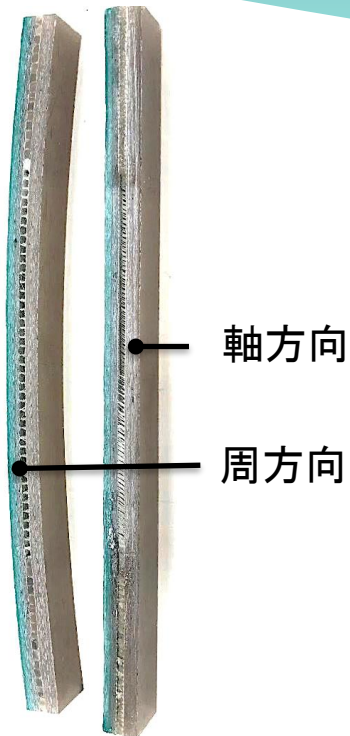


切り出して引張試験
で評価してみると・・・
設計強度に満たない

FW製タンクの強度評価法 - 湾曲構造の強度試験法の提案 -



- 厚板に対応したグリップフェイス
- 試験片とフェイスの間に紙やすり
- 上下グリップを同時に締める
- JIS規格に準じて引張試験を実施
- 中心両面にひずみゲージ



軸方向

周方向

上側グリップ

外殻

内殻

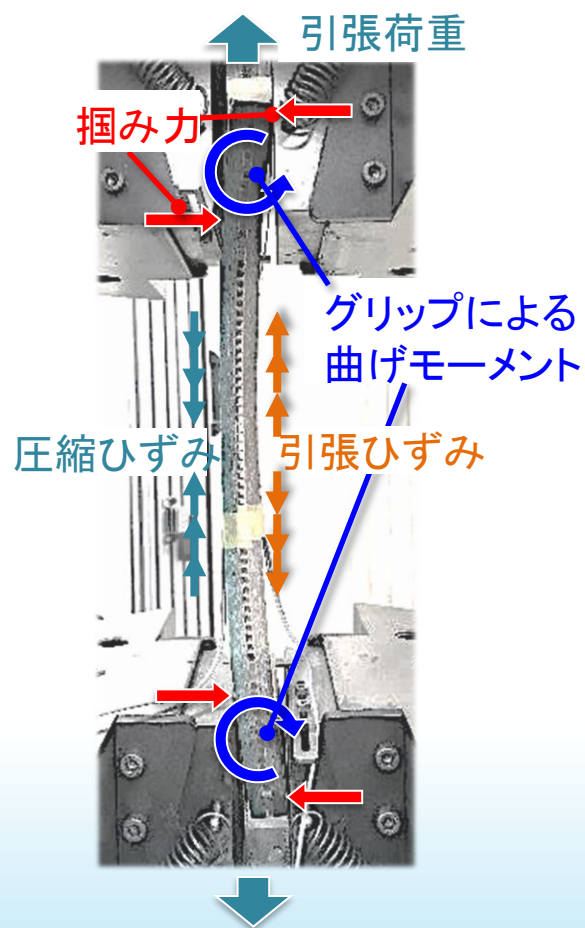
内殻

外殻

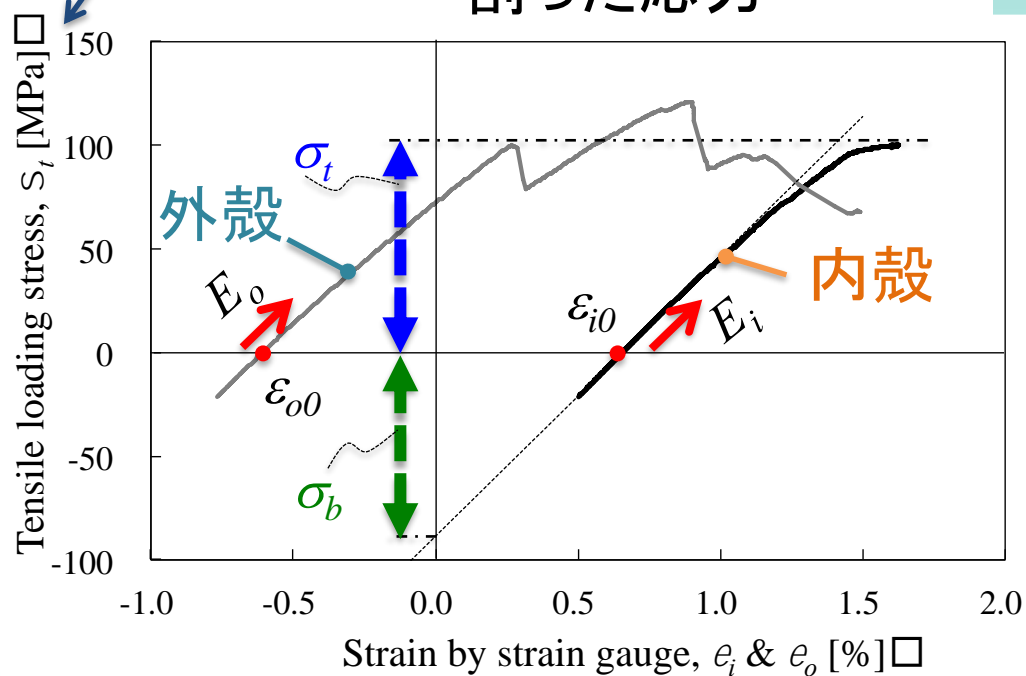
下側グリップ

FW製タンクの強度評価法 - 湾曲構造の強度試験法の提案 -

実験結果：破壊と見掛けの応力ひずみ関係



引張荷重を有効断面積で割った応力



内殻が先に破損

σ_t : 引張軸断面の平均引張応力(これだけでは過小評価)

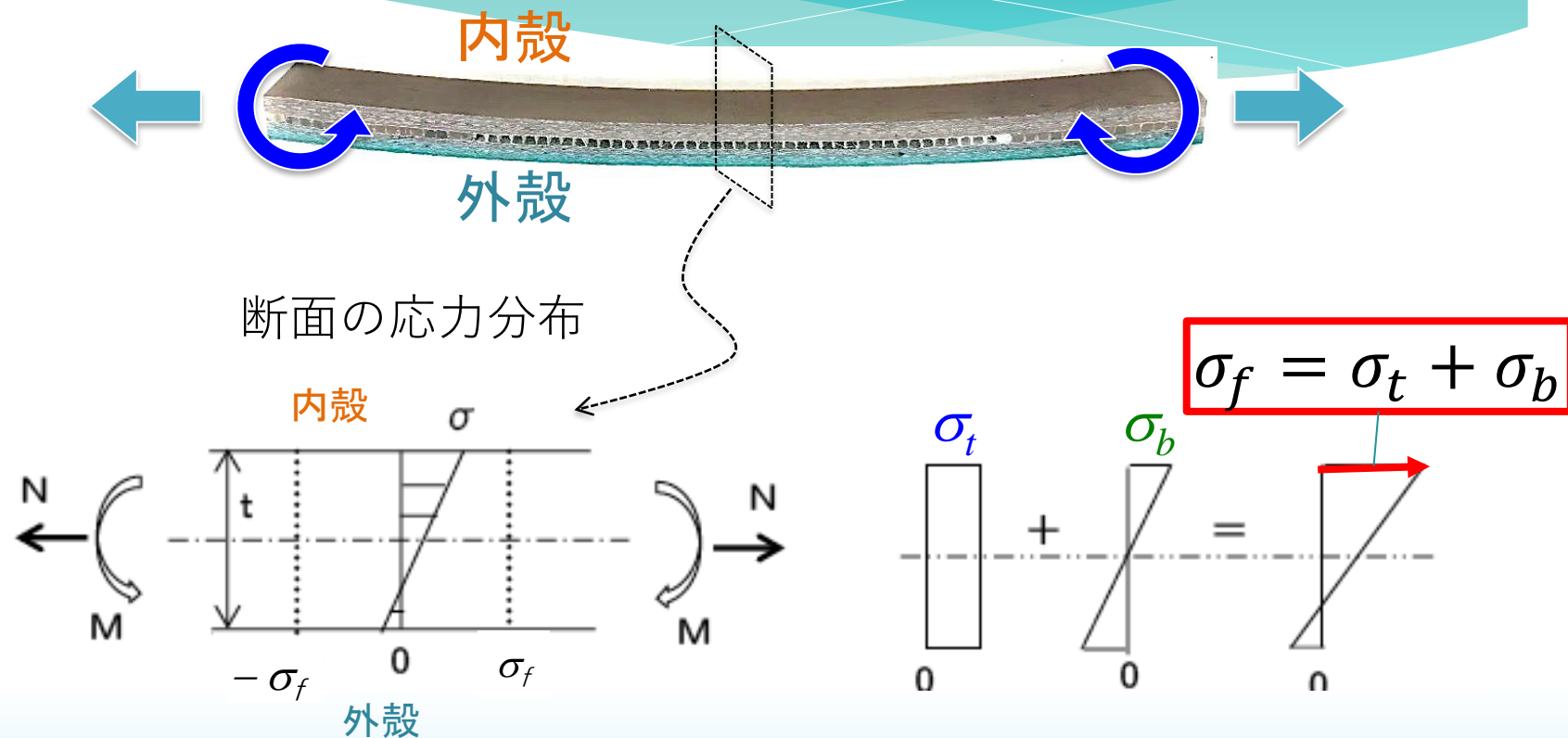
σ_b : グリップ掴み時の表層引張応力(最大曲げ応力)

FW製タンクの強度評価法

- 湾曲構造の強度評価法の提案（ケース1） -

強度の算出：

「引張」と「曲げ」が働く
場合の計算方法

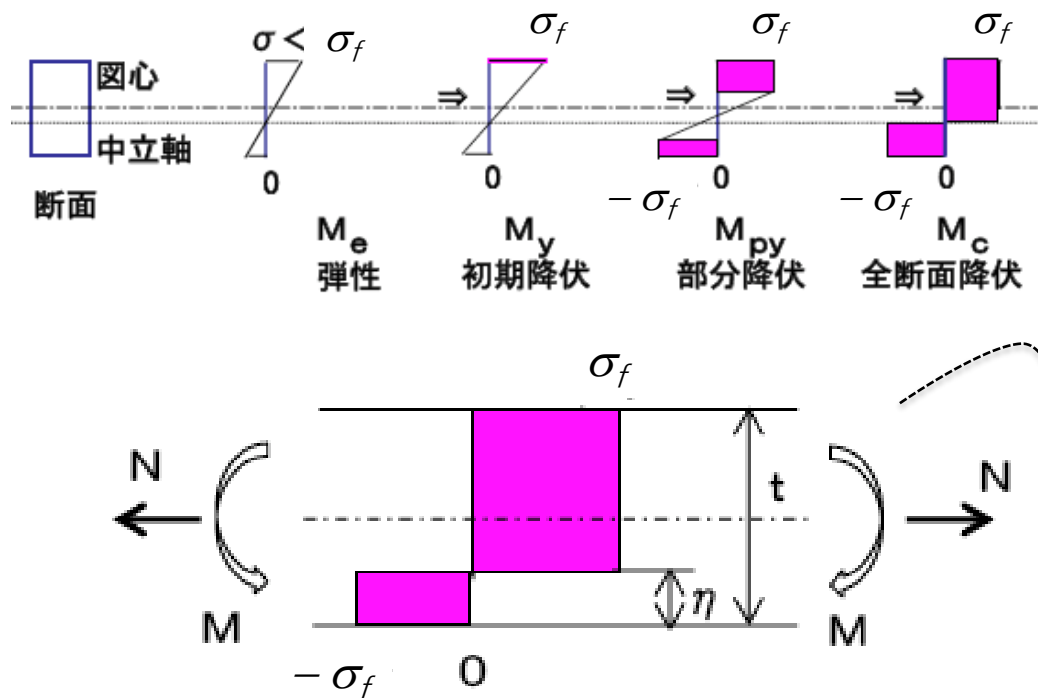


ケース1：内殻の内側表層のみが評価強度 σ_f に到達して破損

FW製タンクの強度評価法

- 湾曲構造の強度評価法の提案（ケース2） -

強度の算出：「引張」と「曲げ」が働く場合の計算方法



引張力

$$N = \sigma_f \cdot b \cdot (t - 2\eta)$$

引張応力

$$\sigma_t = N/bt$$

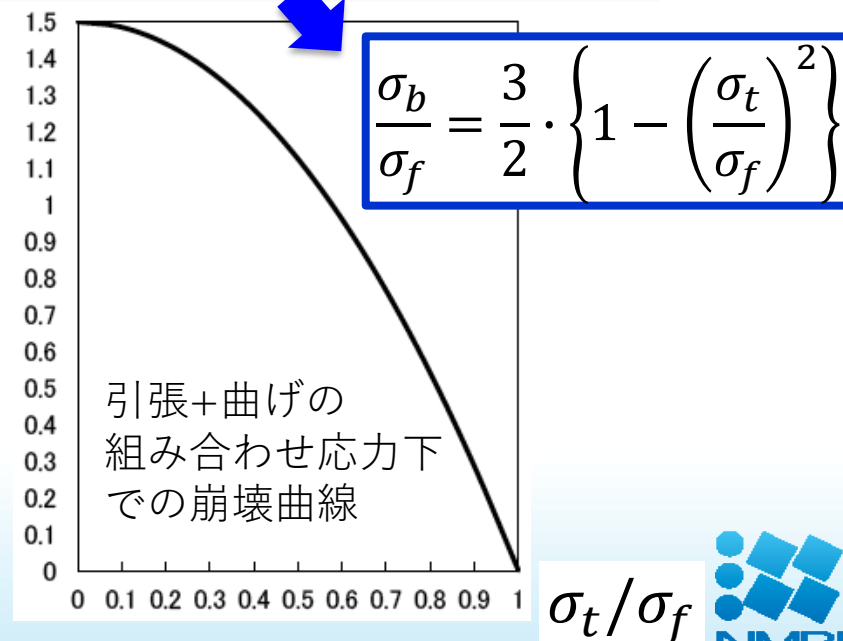
曲げモーメント

$$M = \sigma_f \cdot b \cdot \eta \cdot (t - \eta)$$

曲げ応力

$$\sigma_b = 6M/bt^2$$

σ_b/σ_f

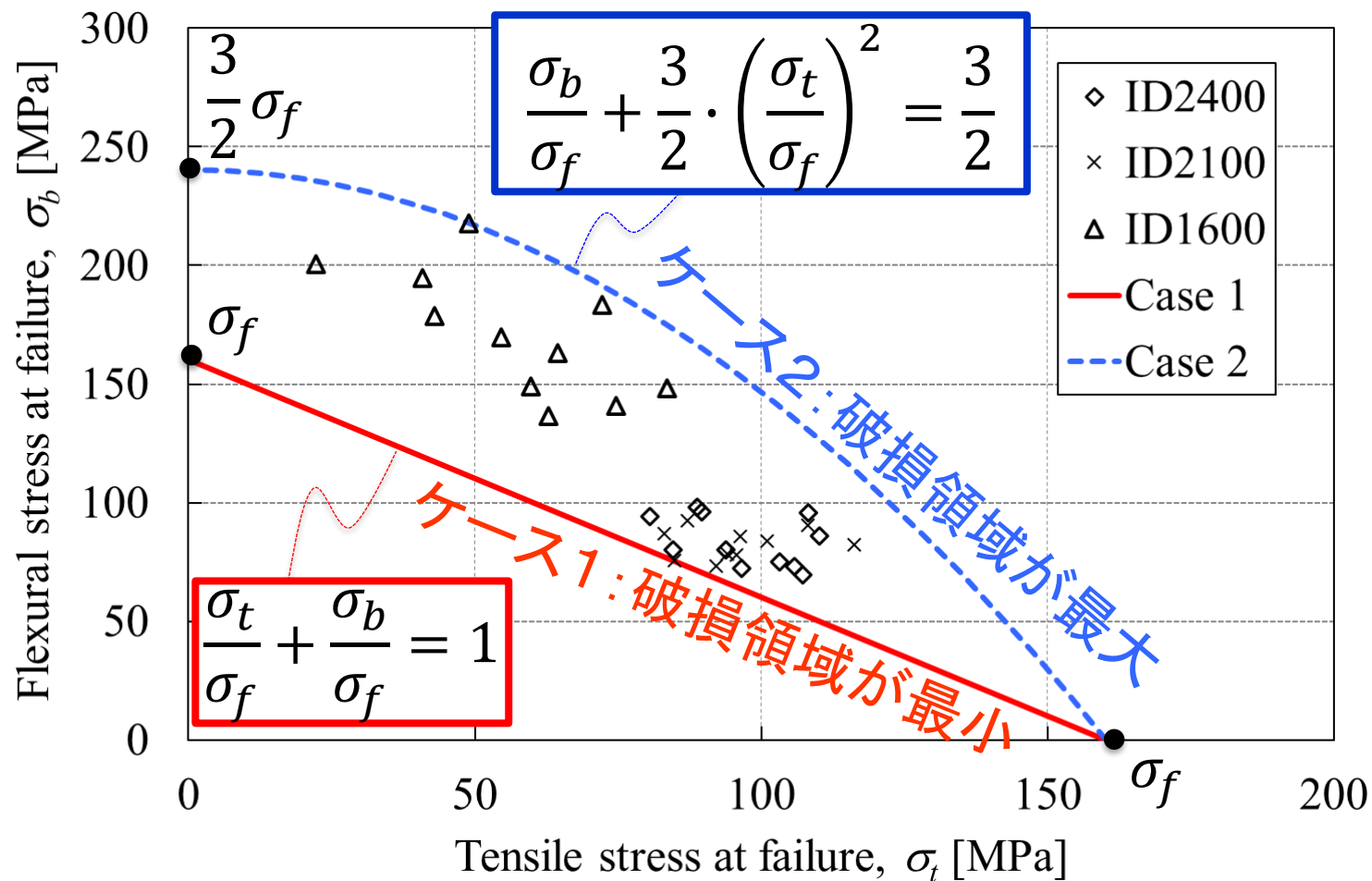


ケース2：全断面が評価強度 σ_f に到達して破損

FW製タンクの強度評価法

- 新強度評価法の妥当性検証 -

1. 材料設計時の平板純強度を σ_f として両ケースの破壊曲線を描画
2. 内径の異なる3種類 (2400, 2100, 1600mm) の湾曲試験片の破壊時の引張・曲げ応力関係をプロット



FW製タンクの強度評価法

- 新強度評価法の実用性 -

実験結果から引張強度を導出・3パターンで比較

- 既存評価法: 引張荷重のみ考慮

$$\sigma_f = \sigma_t$$

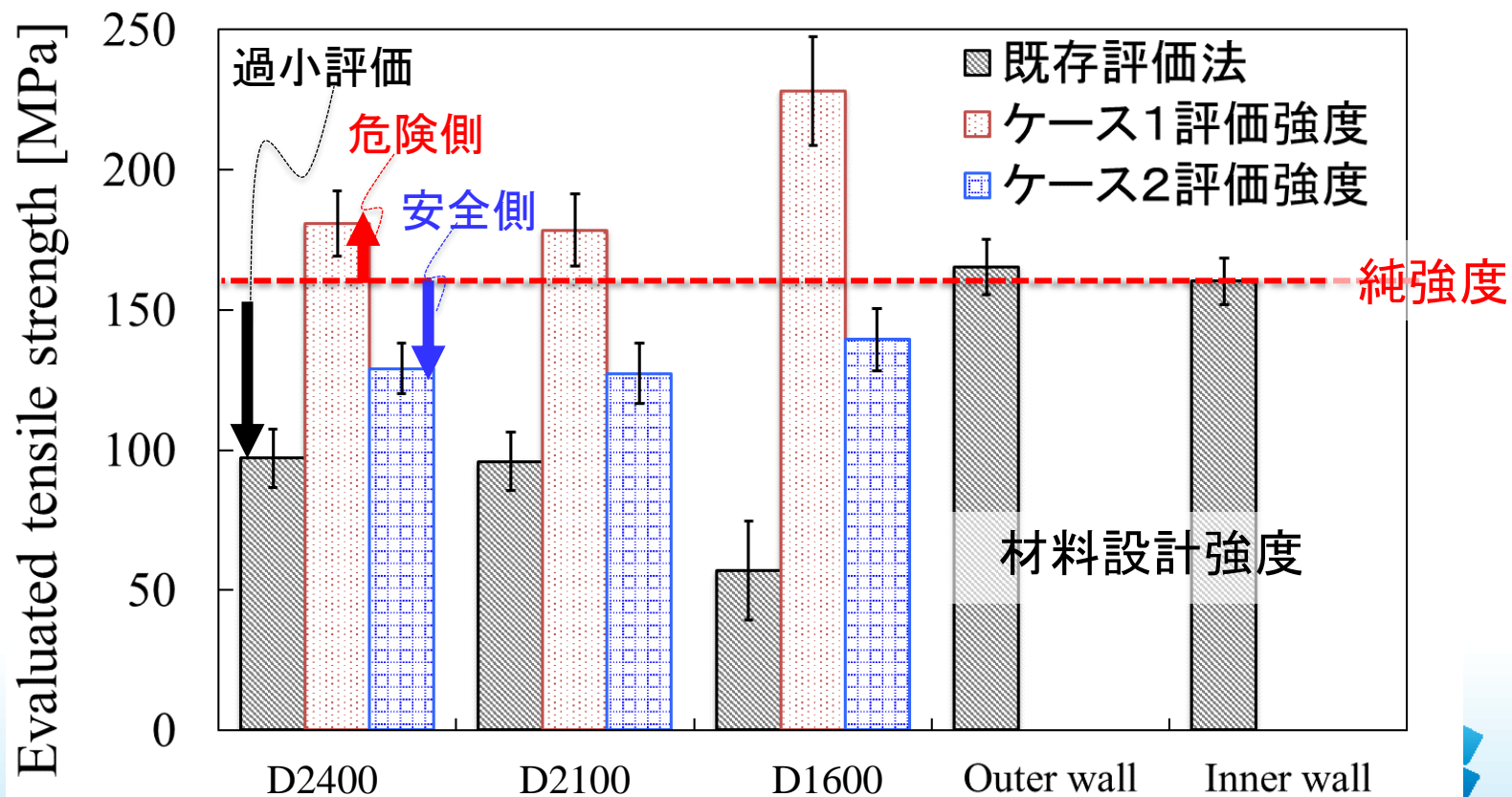
- ケース1: 表層のみ最大応力のみ

$$\sigma_f = \sigma_t + \sigma_b$$

- ケース2: 全断面均一応力

$$\sigma_f = \frac{\sigma_b + \sqrt{\sigma_b^2 + 9 \cdot \sigma_t^2}}{3}$$

↳ 最適な安全側評価



FW製タンクの強度評価法

－ 結論 －

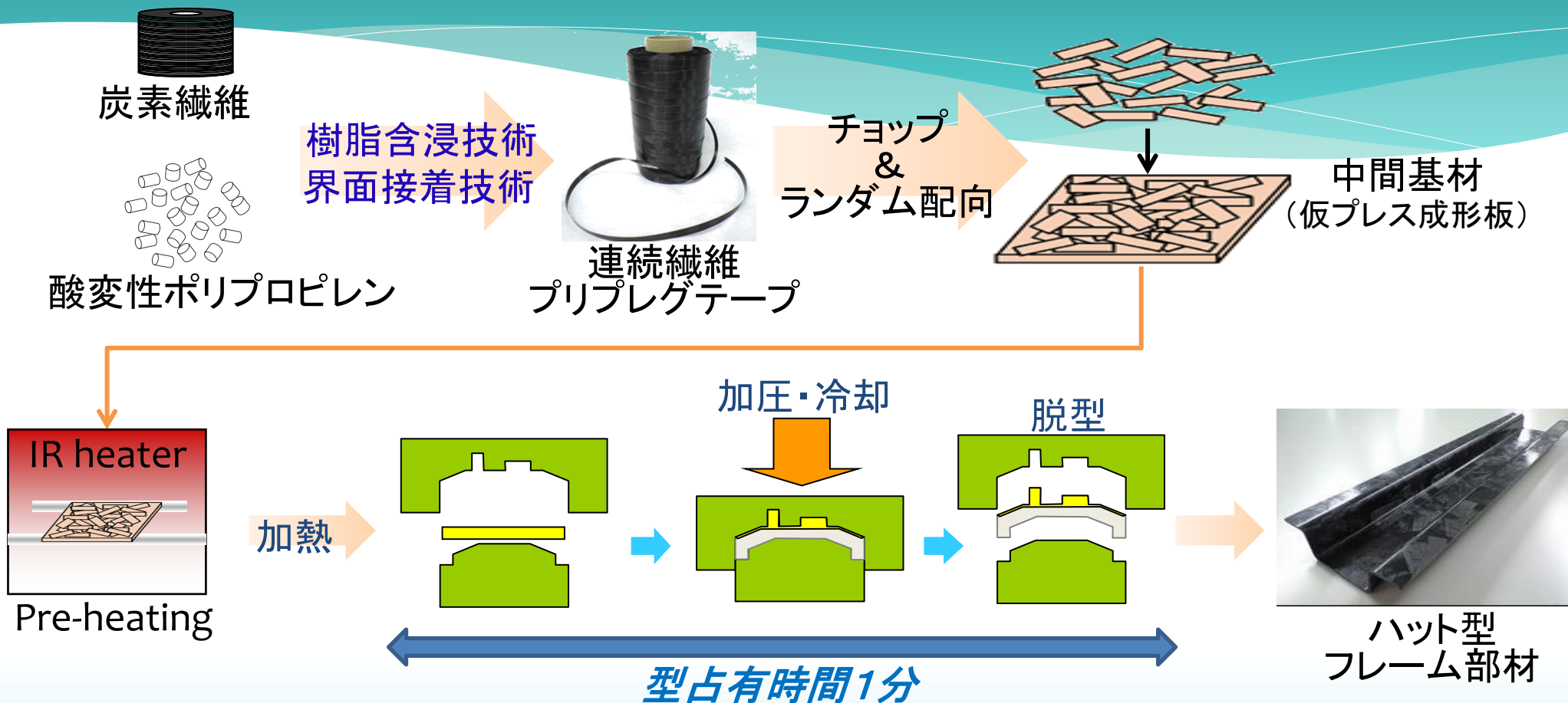
- ❖ タンク湾曲構造の引張試験において，初期グリップ時の曲げ応力を求めて，「引張」と「曲げ」が働く組み合わせ応力状態を考慮して，ケース1および2の強度評価方法を提案した．
- ❖ 両ケースはそれぞれ強度の上限・下限を示す可能性を示し，内径の異なる試験片の結果はそれらの範囲内に収まることが確認された．
- ❖ 全断面均一応力を考慮すれば，内径の違いに依らず，純引張強度を実験的に導出できる可能性を示した．安全側の評価であることから，設計に活用できると考えられる．

Contents

1. 繊維強化複合材料 (FRP) に求められること
2. フィラメント・ワインディング (FW) 製タンクの強度評価法
 - I. 湾曲構造の強度試験・評価法の提案
 - II. 結果と考察
- 3. 層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション**
 - I. 材料モデルの提案
 - II. 結果と考察
4. まとめ

層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - 背景：高生産FRP -

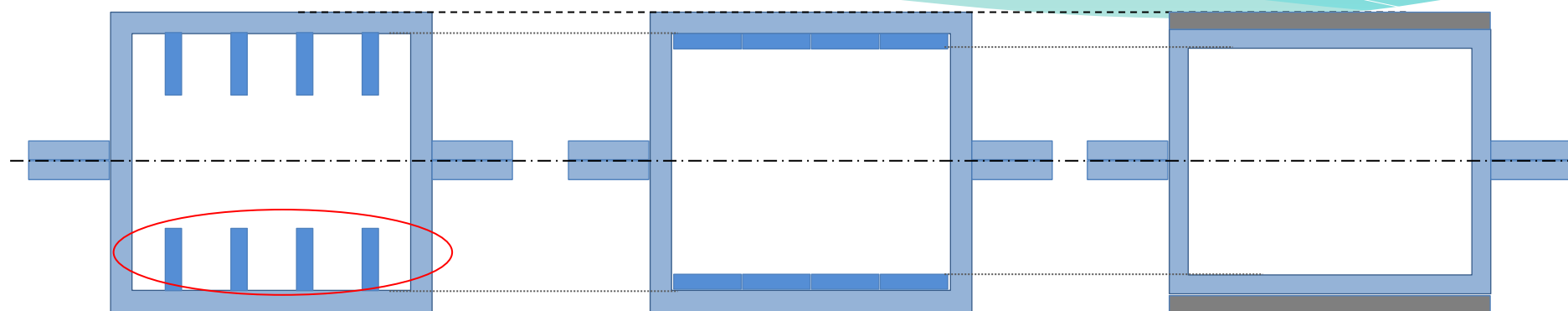
素材から部材までの製造プロセス



FRPのデメリットであった低生産性を克服

層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - 高生産FRPの特長 -

- スチール材料置換を想定
- 外形寸法は変えず
- 密度が約1/6とすると、重量半減のためには断面積は3倍にできる

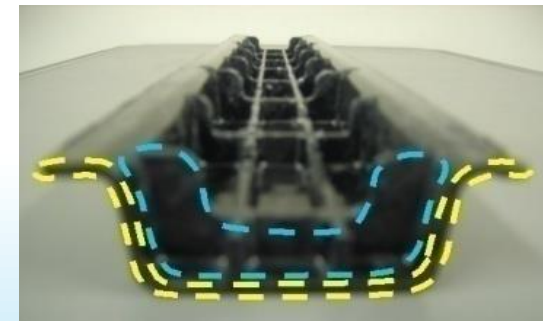
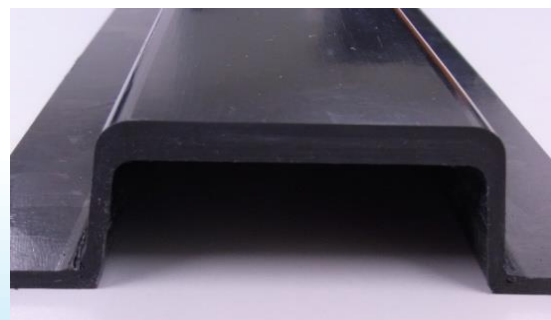


リブ形状の付与

板厚コントロールが容易

連続繊維系との複合一体成形

断面形状自由度が高い

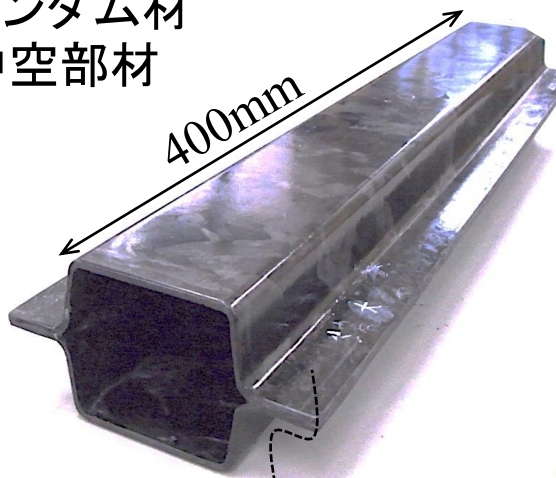


層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - 軸圧潰拳動の材料比較 -

ref) 松尾 他, 面外損傷有限要素モデルを用いた熱可塑性CFRPクラッシュボックスの軸圧潰耐衝撃性に関する考察, 自動車技術会論文集, Vol.48, No.2

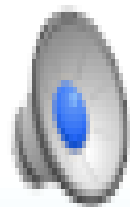
Drop Weight: 900kg Velocity: 50km/h

テープランダム材
による中空部材

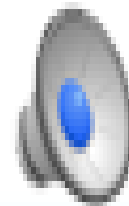


振動溶着雪像

Aluminum alloy
<Spot welding>



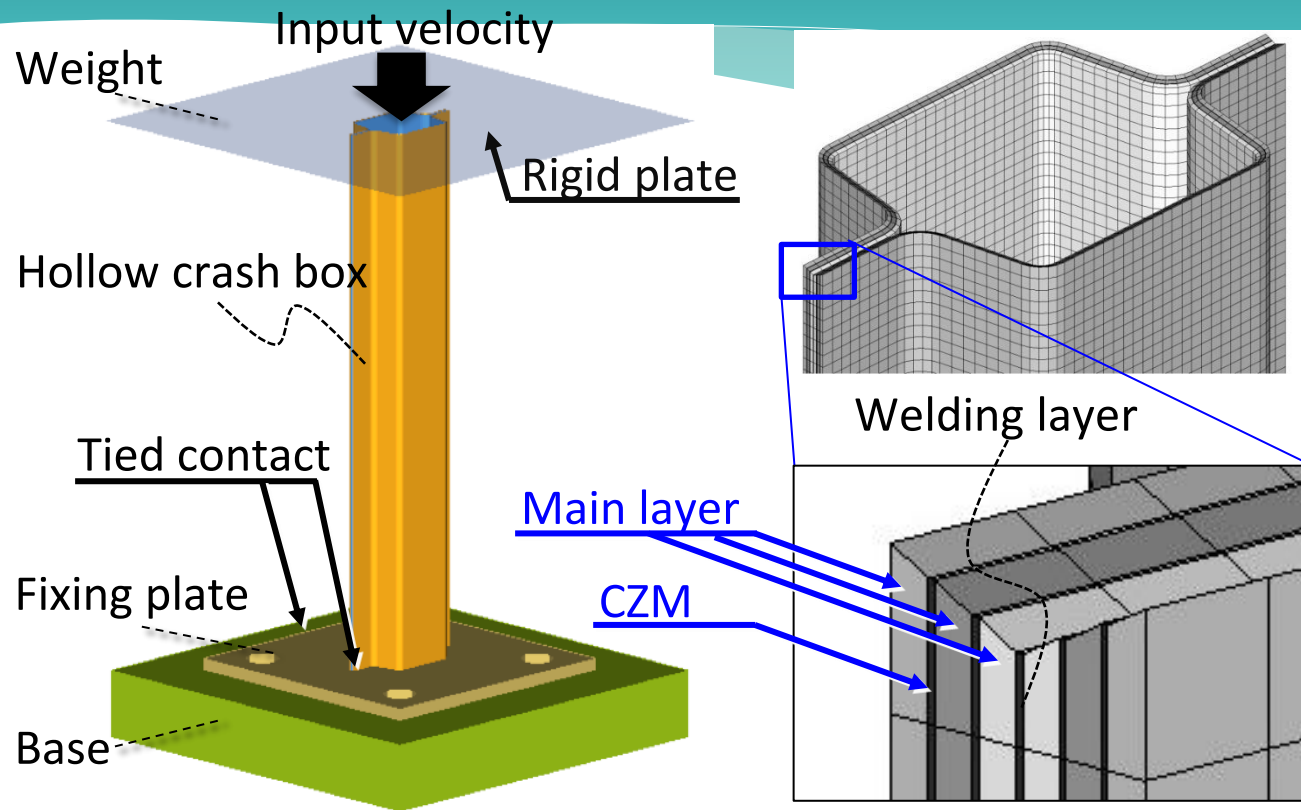
Steel
<spot welding>



衝撃吸収エネルギーは、金属材料の重量比 2 倍の性能

層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - 材料モデル提案 -

ref) T.Matsuo et al. "Numerical modeling and analysis for axial compressive crushing of randomly oriented thermoplastic composite tubes based on the out-of-plane damage mechanism", Composite Structures, Vol.181



Solver(explicit)
: RADIOSS 13.0
Mesh
: HEPH 3D solid

通常のソリッド要素
だけでなく、結合力
要素を層間特性とし
て実装

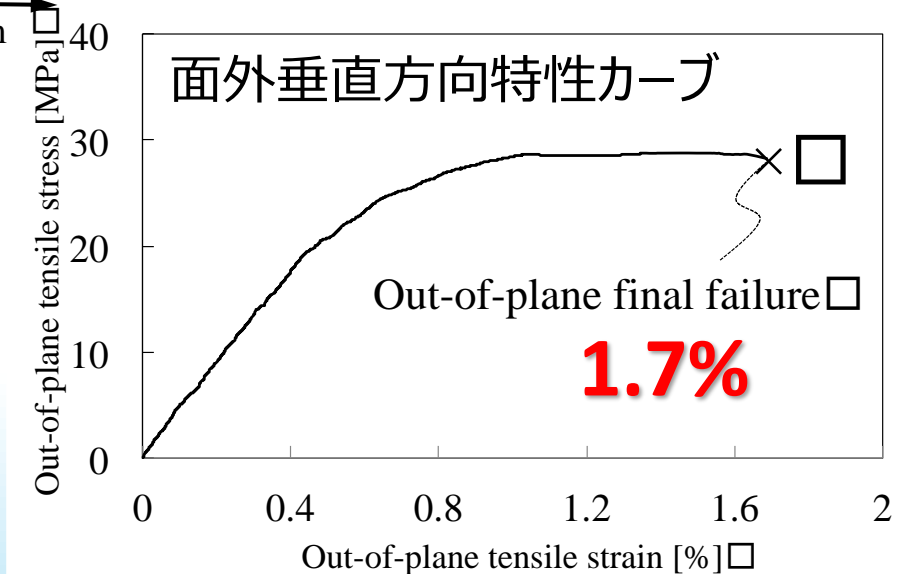
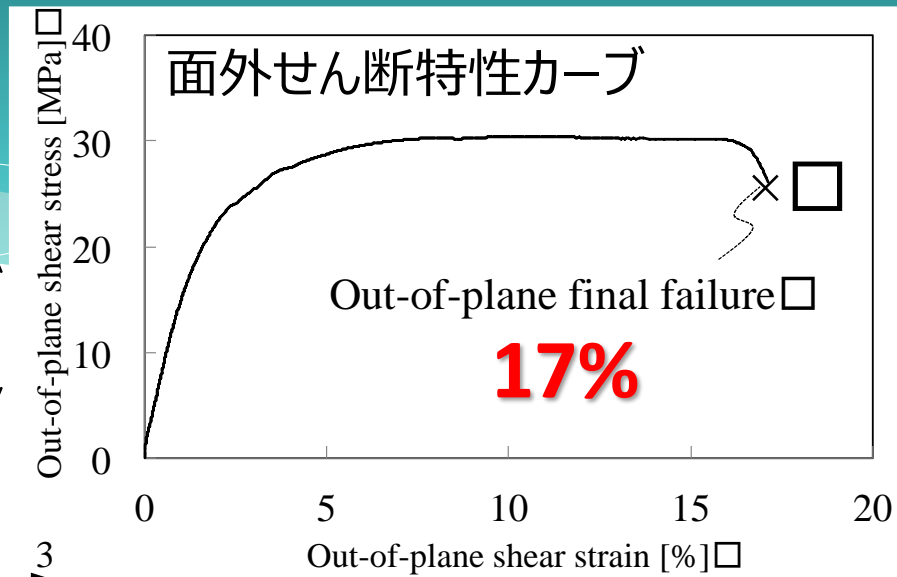
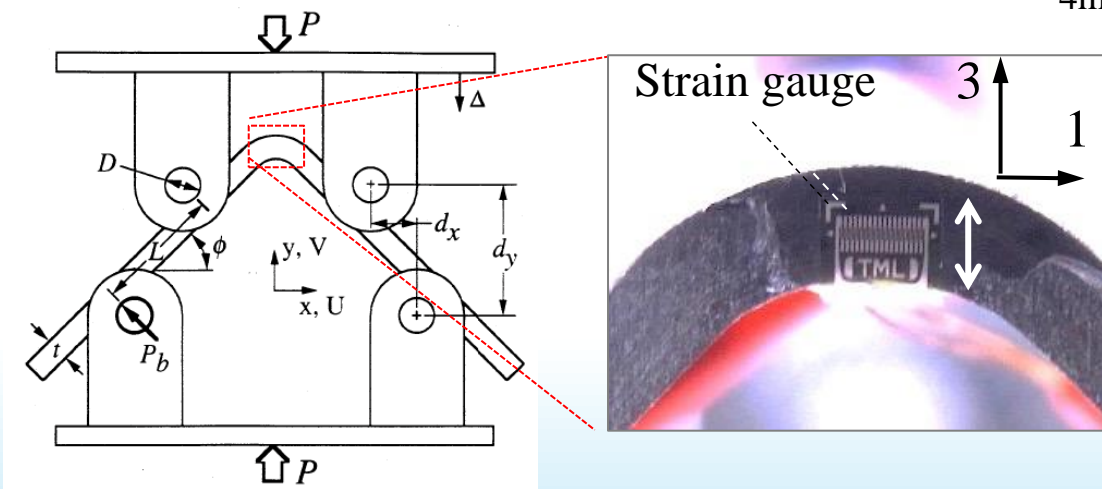
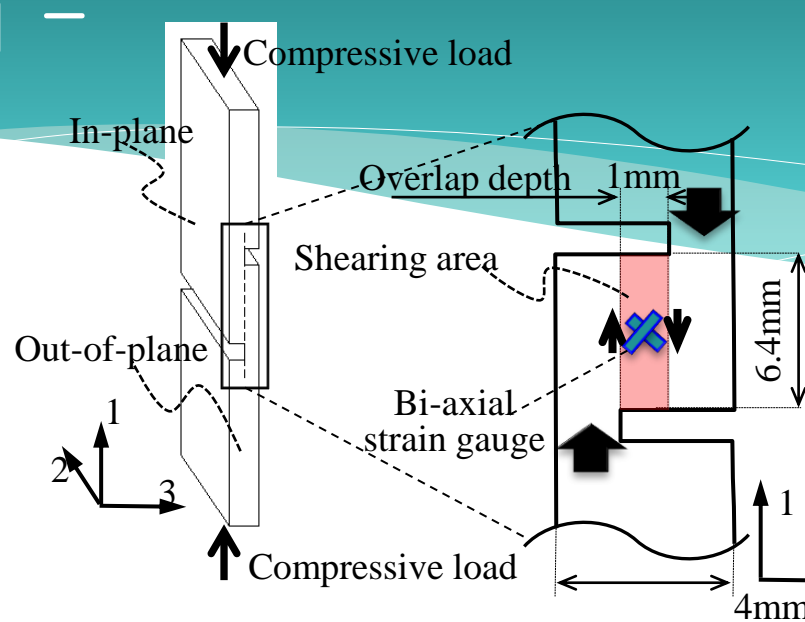
Assign MAT property with **final failure strain**

- ❖ Main layer : law 28 mainly for in-plane
- ❖ CZM (+ welding) : law 59 mainly for out-of-plane

層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - 層間特性評価 -

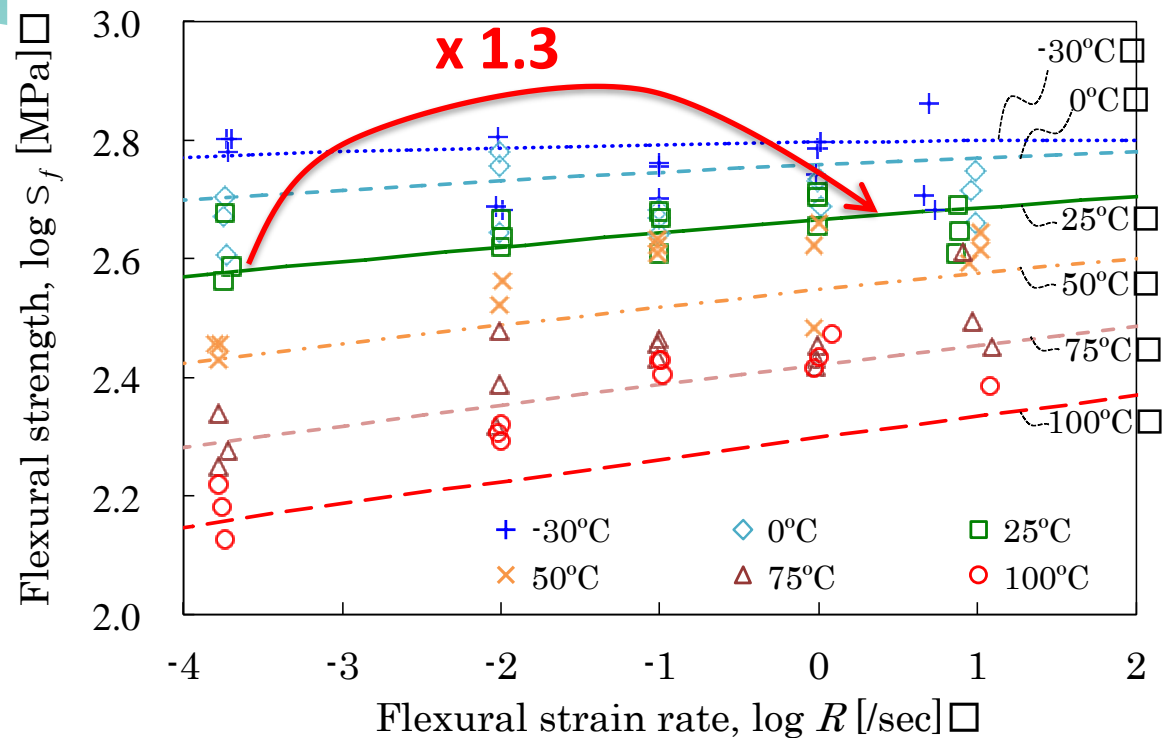
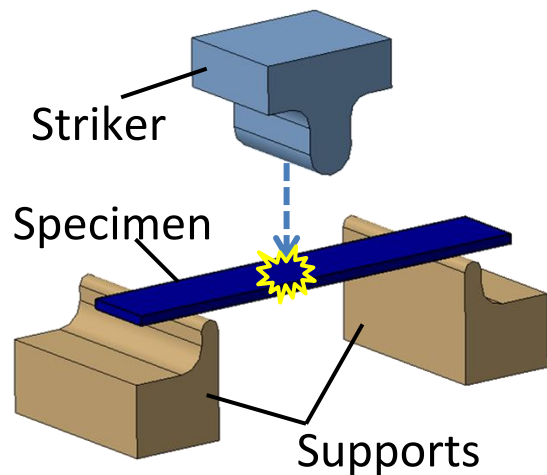
■ 層間パラメータの決定

- ・層間(面外)せん断
 - ・層間(面外)垂直
- の特性を直接法によりそれぞれ取得



層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - 材料の速度依存性評価 -

衝撃 3 点曲げ試験



高速時の強度をひずみ速度依存性を考慮して設定

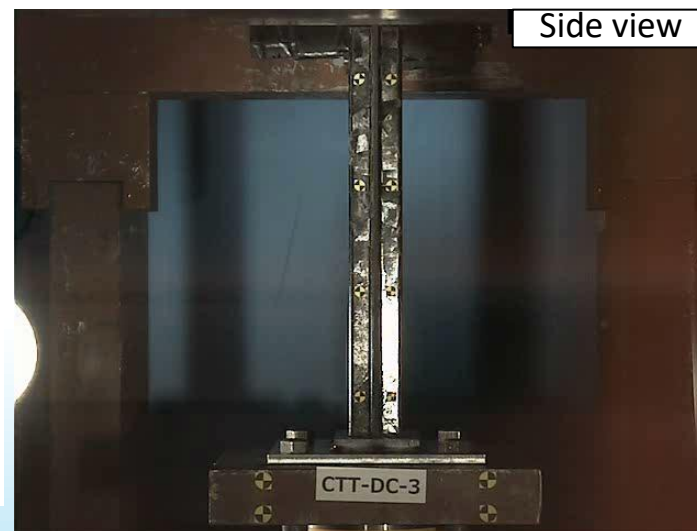
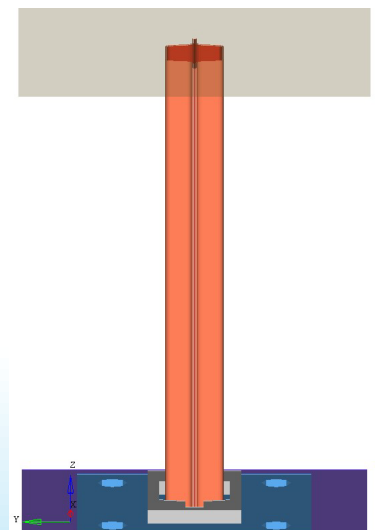
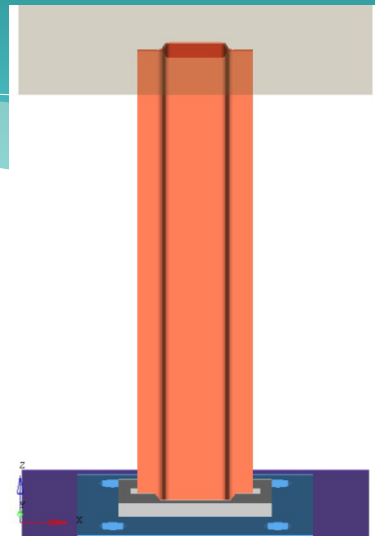
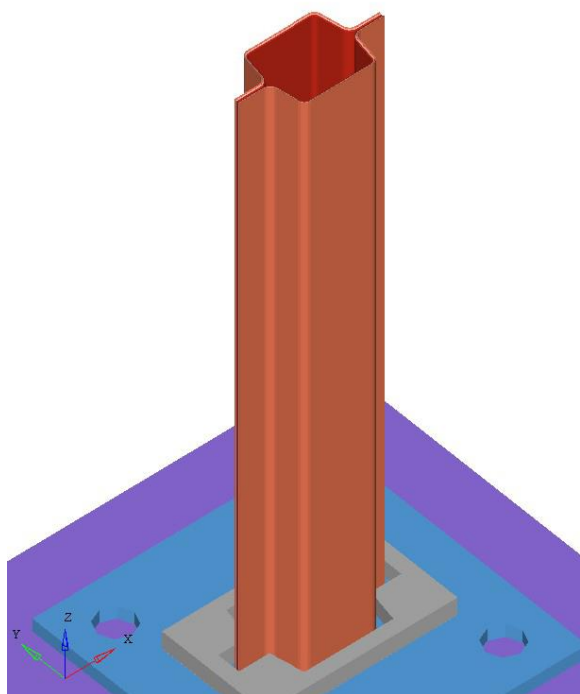
Static

x 1.3 =

Dynamic

層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - 解析結果：破壊挙動 -

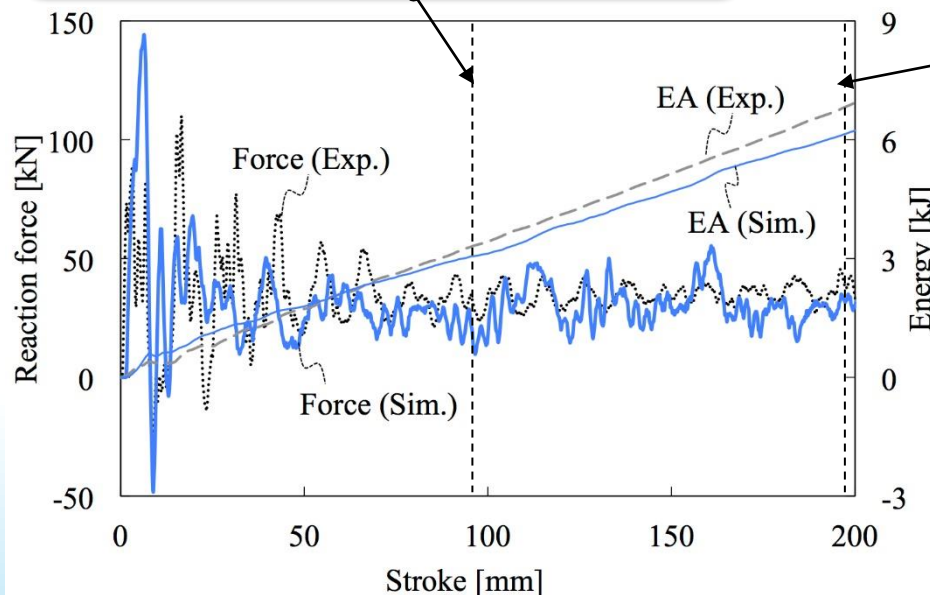
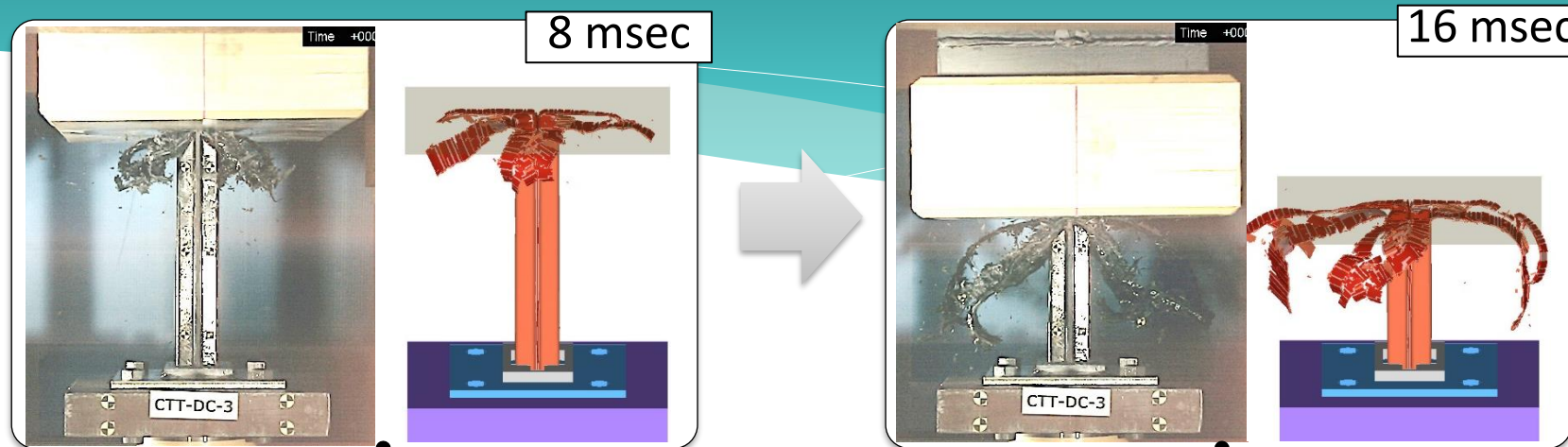
Failure process



層間剥離による損傷モード
を上手く再現

層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - 解析結果：破壊エネルギーの実験との比較 -

逐次破壊荷重と破壊エネルギーの推移

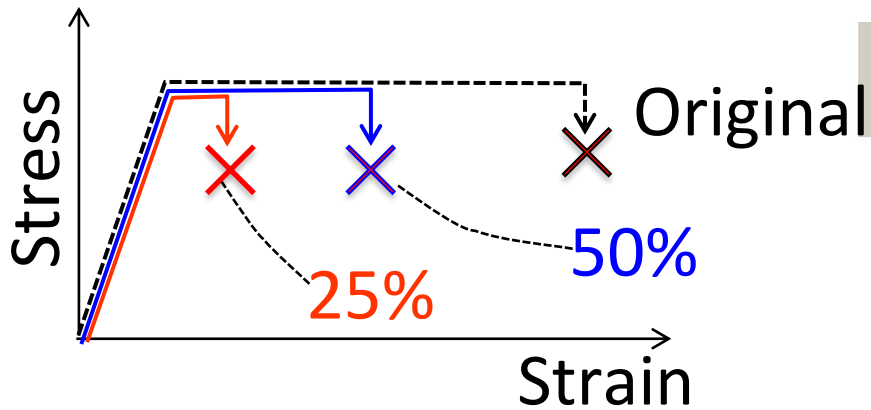


エネルギー吸収性能
が実験と同等

層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - パラメータ・スタディ -

層間特性の破断ひずみによる影響

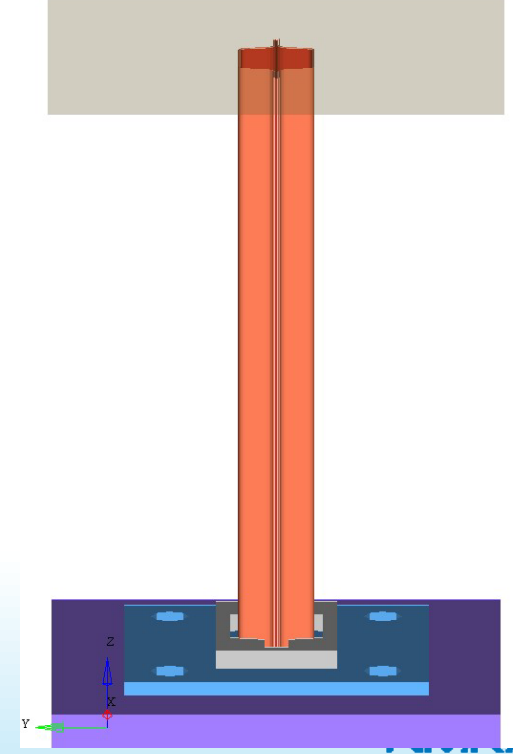
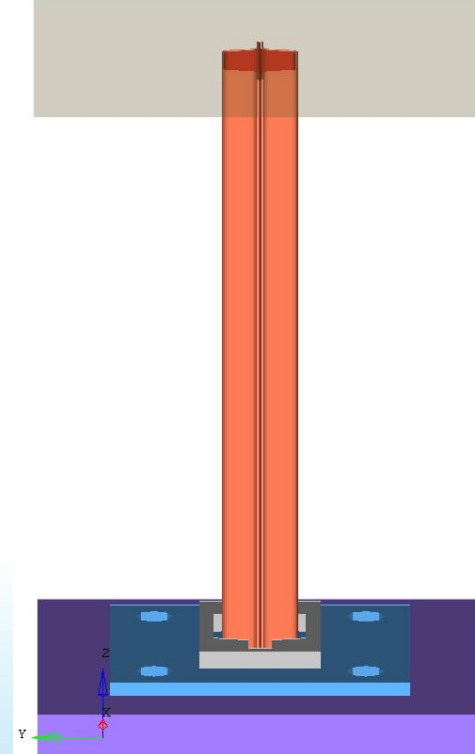
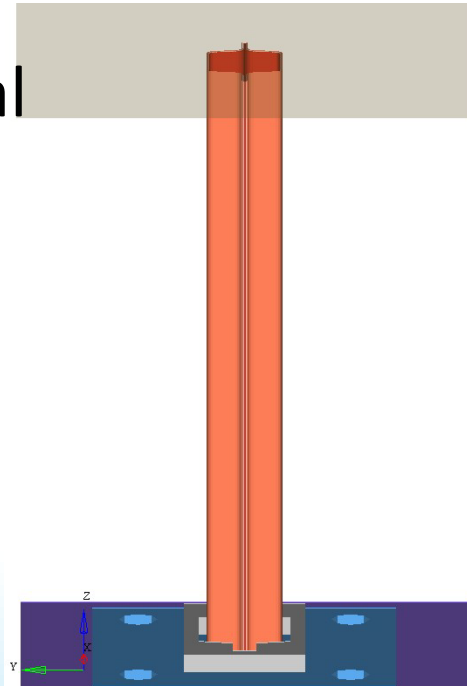
破断ひずみのみを変化して比較



Original

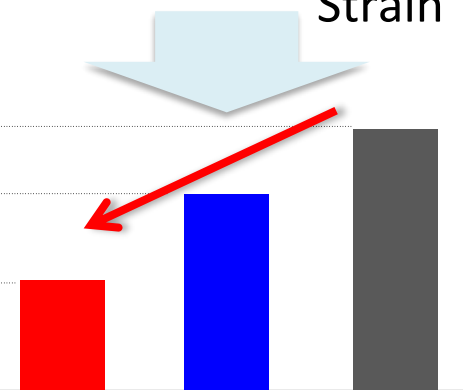
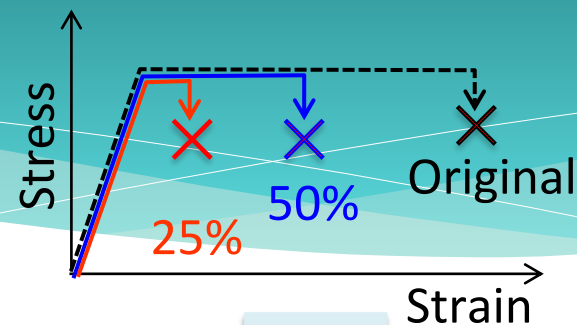
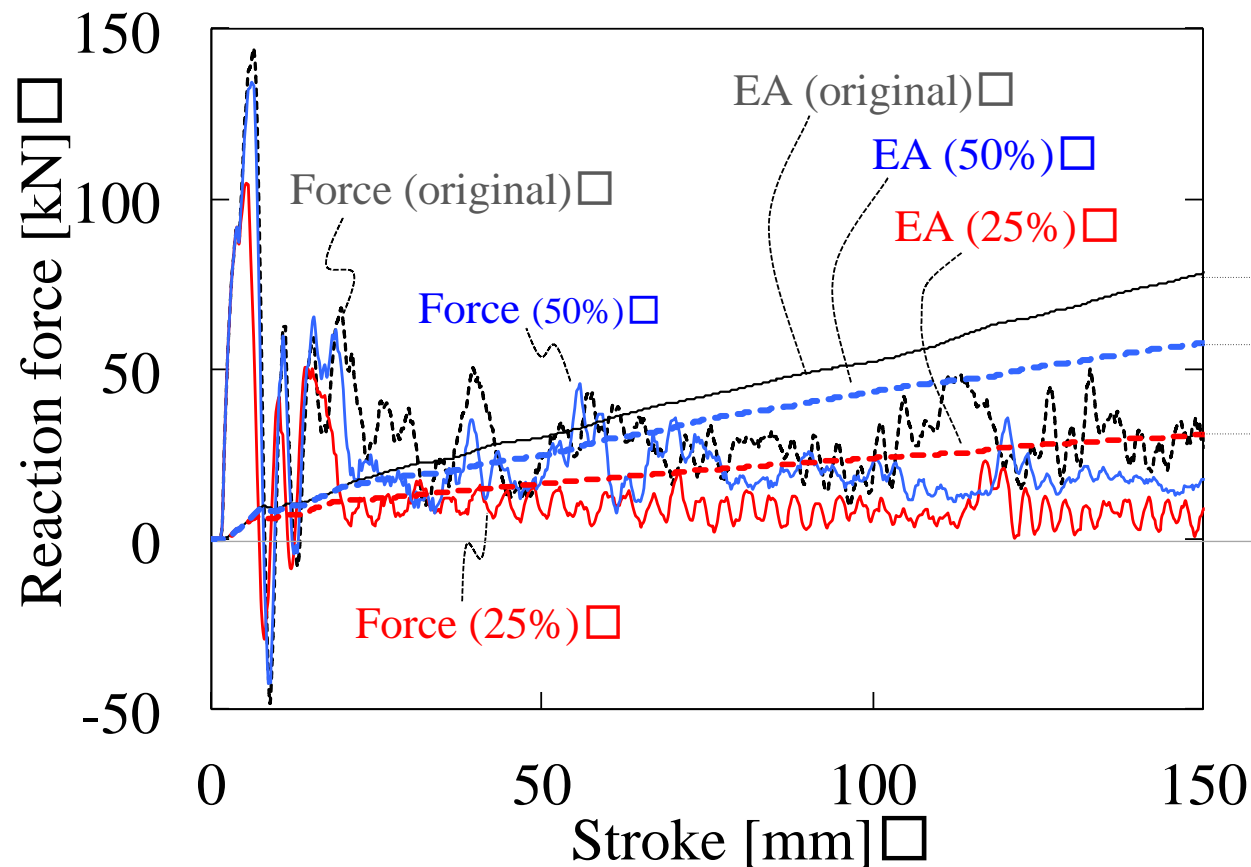
Failure strain :
50 %

Failure strain :
25 %



層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション - パラメータ・スタディ -

層間特性の破断ひずみによる影響



層間破断ひずみによって
劇的に衝撃吸収性能が変
わる事が判明

層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション

－ 結論 －

- ❖ ランダム配向FRPは、金属同等以上の衝撃吸収性能を発現する可能性がある。
- ❖ その性能を設計できるようにするために、層間破壊特性を材料モデルに組み入れた数値解析シミュレーションを構築した
- ❖ シミュレーションが実験結果を上手く再現でき、かつパラメータ・スタディによって、層間剥離の影響を定量的に分析できるようになり、材料・構造の設計方針を決める手助けになり得る

Contents

1. 繊維強化複合材料 (FRP) に求められること
2. フィラメント・ワインディング (FW) 製タンクの強度評価法
 - I. 湾曲構造の強度試験・評価法の提案
 - II. 結果と考察
3. 層間損傷を考慮した衝撃吸収シミュレーション
 - I. 材料モデルの提案
 - II. 結果と考察
4. まとめ

まとめ

- ❖ FRPは軽量であるだけでなく、従来材料に無い機能や性能を付与できる可能性がある
例) 耐腐食性、一体成形、自由断面設計 etc
- ❖ 低コスト化と高信頼性が両立できれば、様々な構造に適用できる見込みがあり、開発・生産コストを大きく下げる技術研究が進められている
例) 船用プロペラ、水素タンク、耐衝撃構造 etc
- ❖ 海上・海洋構造物へのFRP適用のための新たな評価法や設計法を提案し、基礎となるガイドラインを普及・拡大させて、海とFRPのデファクトスタンダードを目指す

ご清聴ありがとうございました

