



第25回 海上技術安全研究所研究発表会



# 船舶・海洋構造物の製造および補修の施工性向上 に資する接合工法の新しい取組み

令和7年7月18日

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

海上技術安全研究所

構造・産業システム系

松尾 剛、岩田 知明

笛木 隆太郎 (元海技研)

1. 背景
2. 造船DXにおける新工法・新材料の位置づけ
3. 研究紹介 1 : ニードルピーニングによる溶接部の疲労強度改善
4. 研究紹介 2 : 接着接合の信頼性評価法
5. 研究紹介 3 : FRP接着施工による補強・補修
6. まとめ

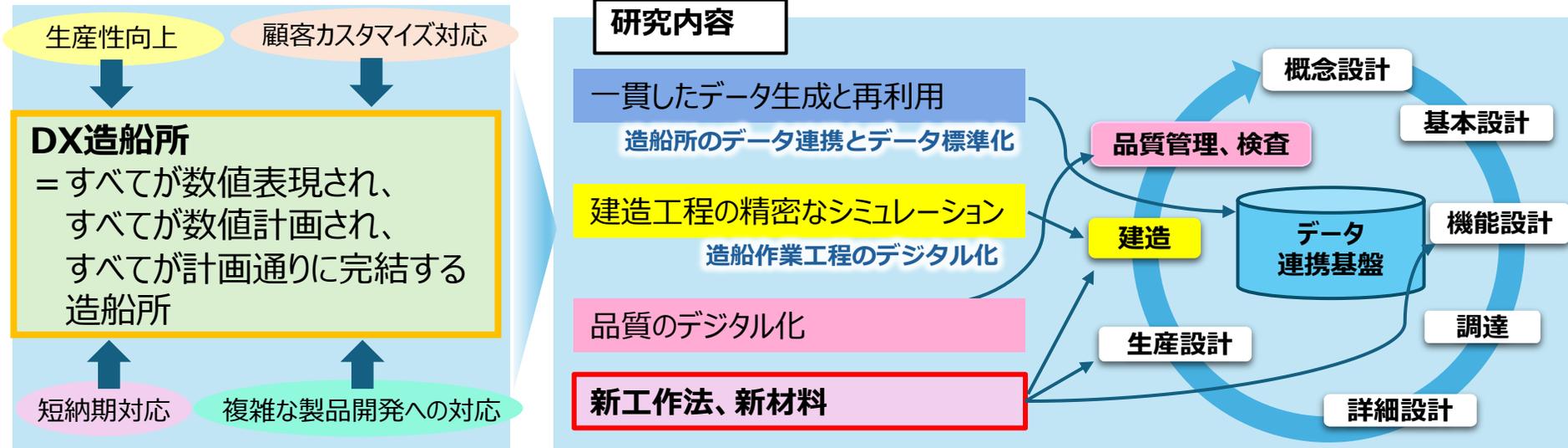
- 第5期国土交通省技術基本計画では、造船所の抜本的な生産性向上と船舶のライフサイクル全体での価値を高めるため、設計から竣工、その後の運航・メンテナンスも含めたライフサイクル全体の高効率化に貢献する技術の実現が期待されている。
- 重点研究「DX造船所」の研究の一環として、建造工程管理システムの開発と共に、接合工程における品質マネジメントの高次元化に資する、接合の新工法・新評価手法に関する研究を実施している。

サブテーマの一つ

接合の新工法・評価技術に関する研究

について紹介

## 海技研の造船DXに関する研究の全体像



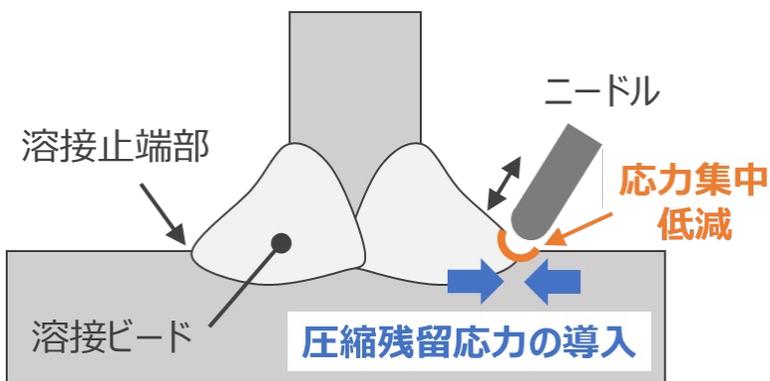
- 造船DXにおける新作法・材料の課題
- 施工方法・品質のばらつき（作業者技量差、材料特性に起因）
  - 作業者の経験・技能への依存によるDX推進の阻害
  - デジタルによる施工管理・標準化が困難な現状

新作法・新材料の提案による効果

- 作業プロセスを自動化・標準化し、作業者依存を排除
- 溶接不要材料・歪み低減材料の活用で施工品質を安定化
- 「誰が、いつ施工しても」同一の施工品質・施工時間を実現

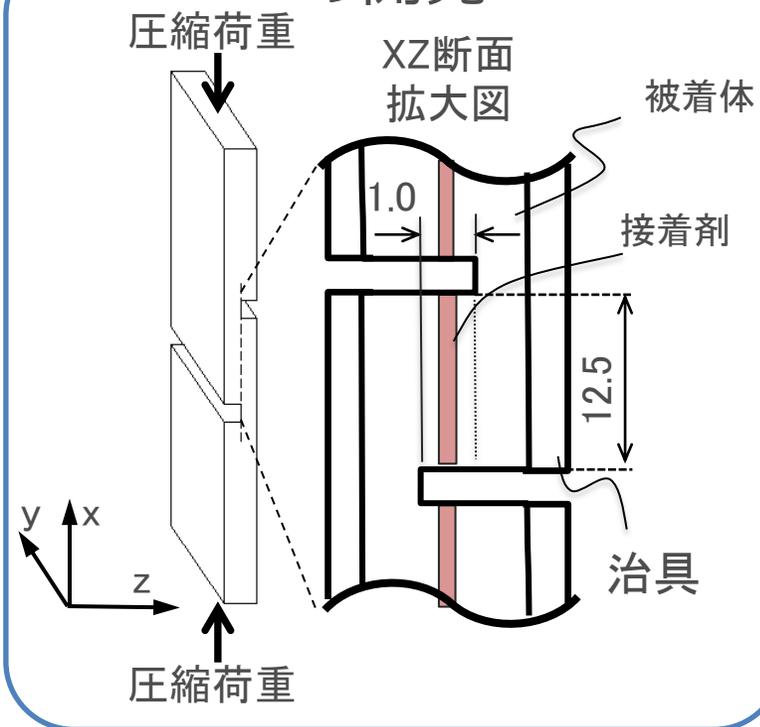
特に、品質と作業性の安定化の「鍵」  
となる接合技術に着目

## ニードルピーニングによる溶接部の疲労強度改善



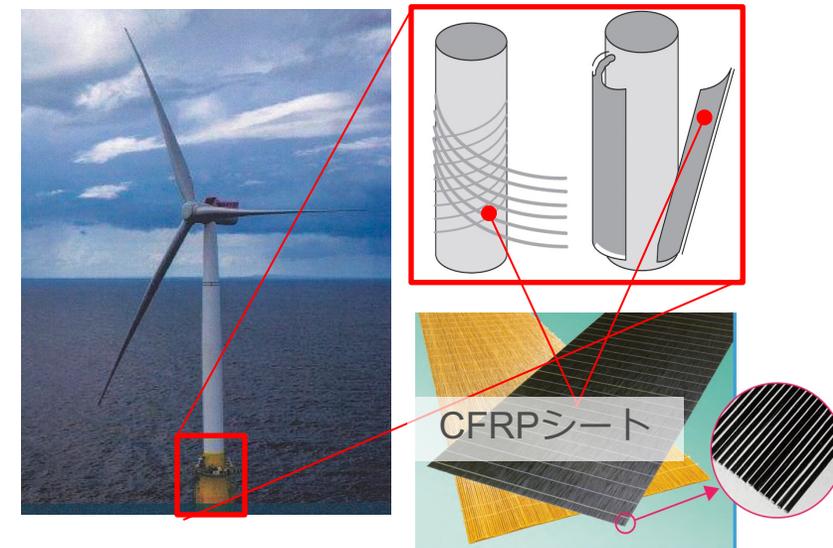
- 圧縮エア駆動によりニードルを溶接止端部に打撃し圧縮残留応力を付与
- 止端形状付与による応力集中の低減（グラインダー研削の代替法）

## 接着性能評価法の開発



- 均一なせん断応力分布を実現
- 強度や弾性率の評価値を設計値として適用可

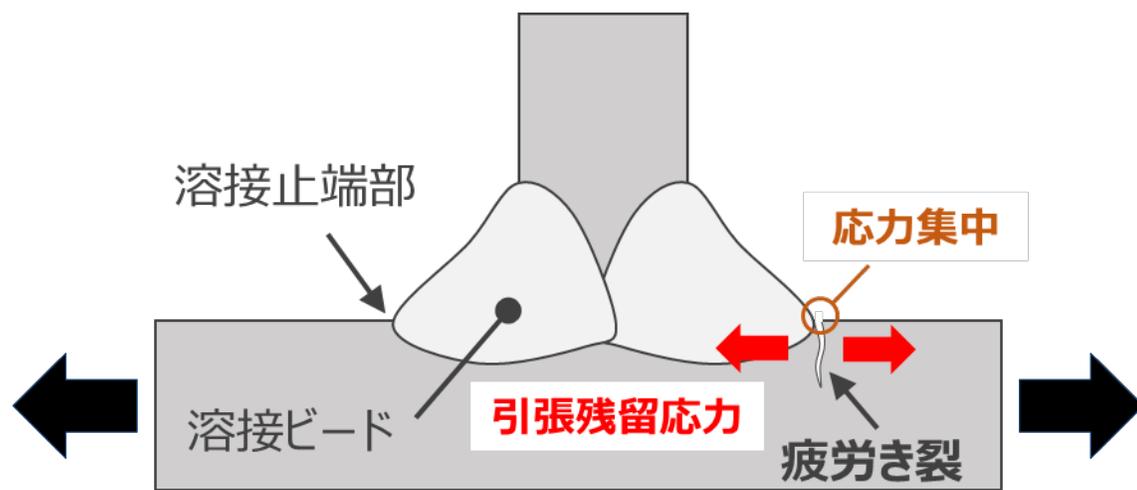
## FRP接着施工による補強・補修



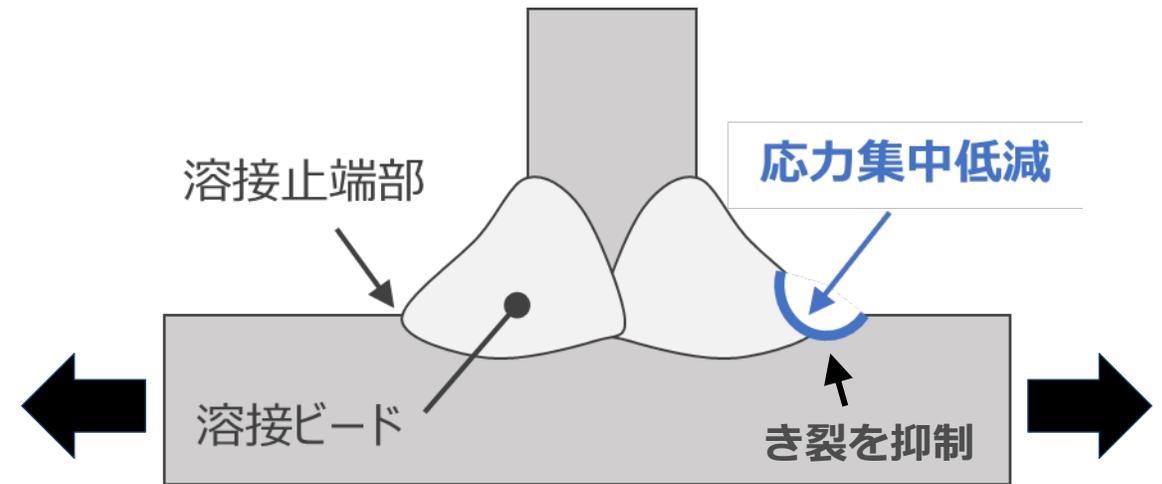
- 軽量補強部材による接着施工
- 簡便かつその場施工可能（補修用途）

# 研究紹介 1 : ニードルピーニングによる溶接部の 疲労強度改善

- 溶接部は平滑部よりも繰り返し荷重負荷による疲労き裂が発生しやすい
- 溶接部の疲労強度改善にはグラインダで溶接止端部を研削し、応力集中を低減させることが有効とされており、造船業においても広く用いられている
- しかし、手作業による研削が主流であり高いスキルが必要。人によって品質が安定しない、あるいは、作業が長時間化する



溶接部における疲労き裂の発生メカニズム



グラインダによる止端形状成形イメージ

代替施工法として、ニードルピーニングに着目

# ニードルピーニングの特徴と新しい工法



- 引張荷重がかかる溶接部に、圧縮残留応力を付与することで、実質的に与えられる繰り返し引張応力を低減する効果があり、き裂発生やき裂進展を抑制できる
- 陸上構造物（橋梁など）では、すでに広く使用されている

可搬型エア式ニードルピーニング装置



← 新提案

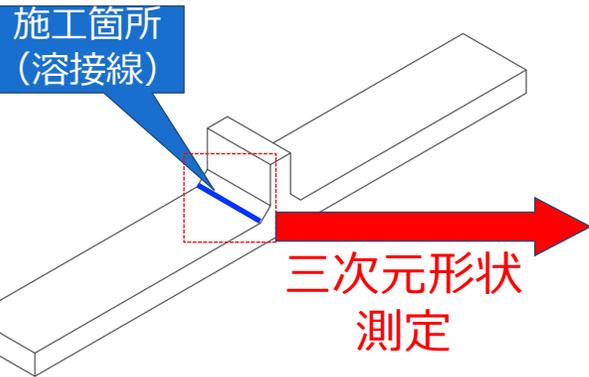
	作業性と品質	応力集中 低減効果	圧縮残留応力の付与
グラインダ処理	作業者の技能に依存 品質安定しない	高い	なし
既存のニードル ピーニング	装置側で作業時間と 品質を制御可能	低い	あり (ただし、過大な圧縮荷 重により残留応力が減衰 するため、船体構造への 適用可能箇所は限定)
ニードルピーニン グの新工法	装置側で作業時間と 品質を制御可能	大径化に より向上	あり → 仮に圧縮残留応力が 減衰しても高強度を維持

# 新しいニードルピーニング法による止端部形状

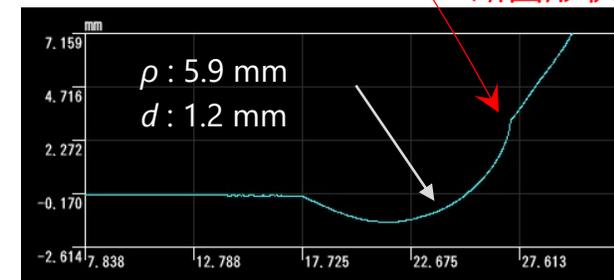
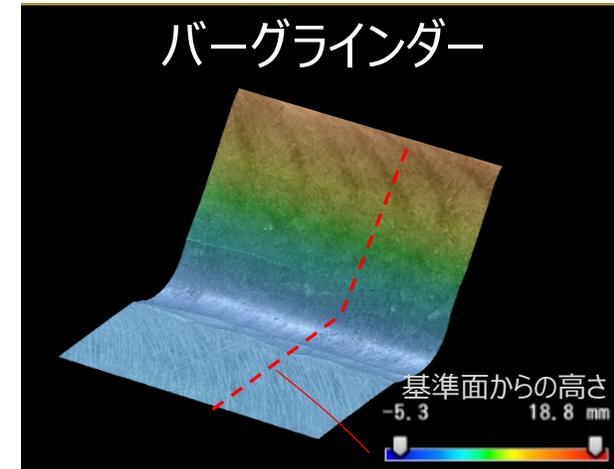
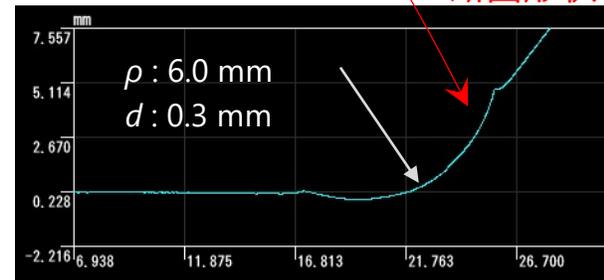
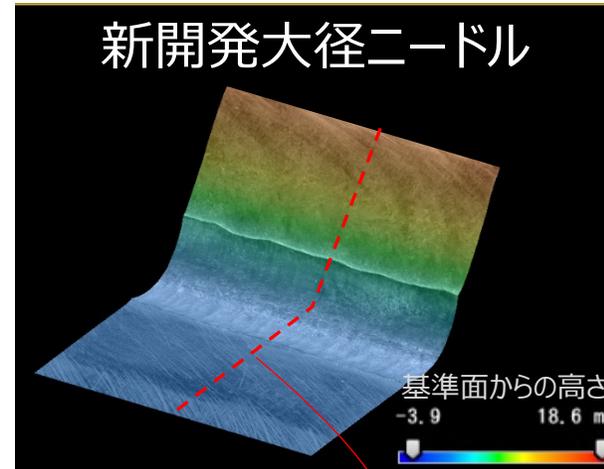
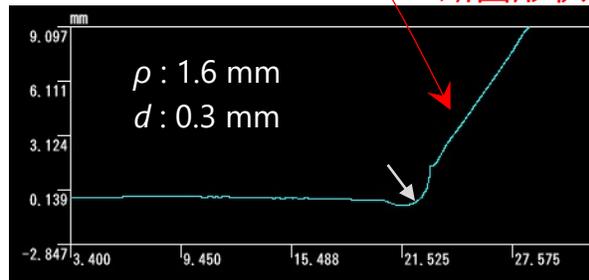
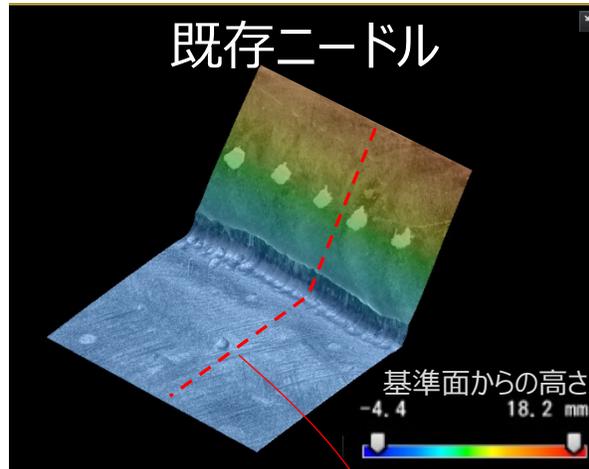


ニードルの大径化に伴い、加工条件パラメータ「打撃力」、「速さ」、「施工回数」などを様々に変えて最適条件を探究（鋼船規則C編の規定【主板の建造板厚22mmの場合、 $\rho \geq 6 \text{ mm}$ 、 $0.5 \text{ mm} \leq d < 1.5 \text{ mm}$  <sup>(1)</sup>】を目標）

板厚22mmのT字型すみ肉溶接継手による検証例



$\rho$ : 加工部の曲率半径  
 $d$ : 加工深さ

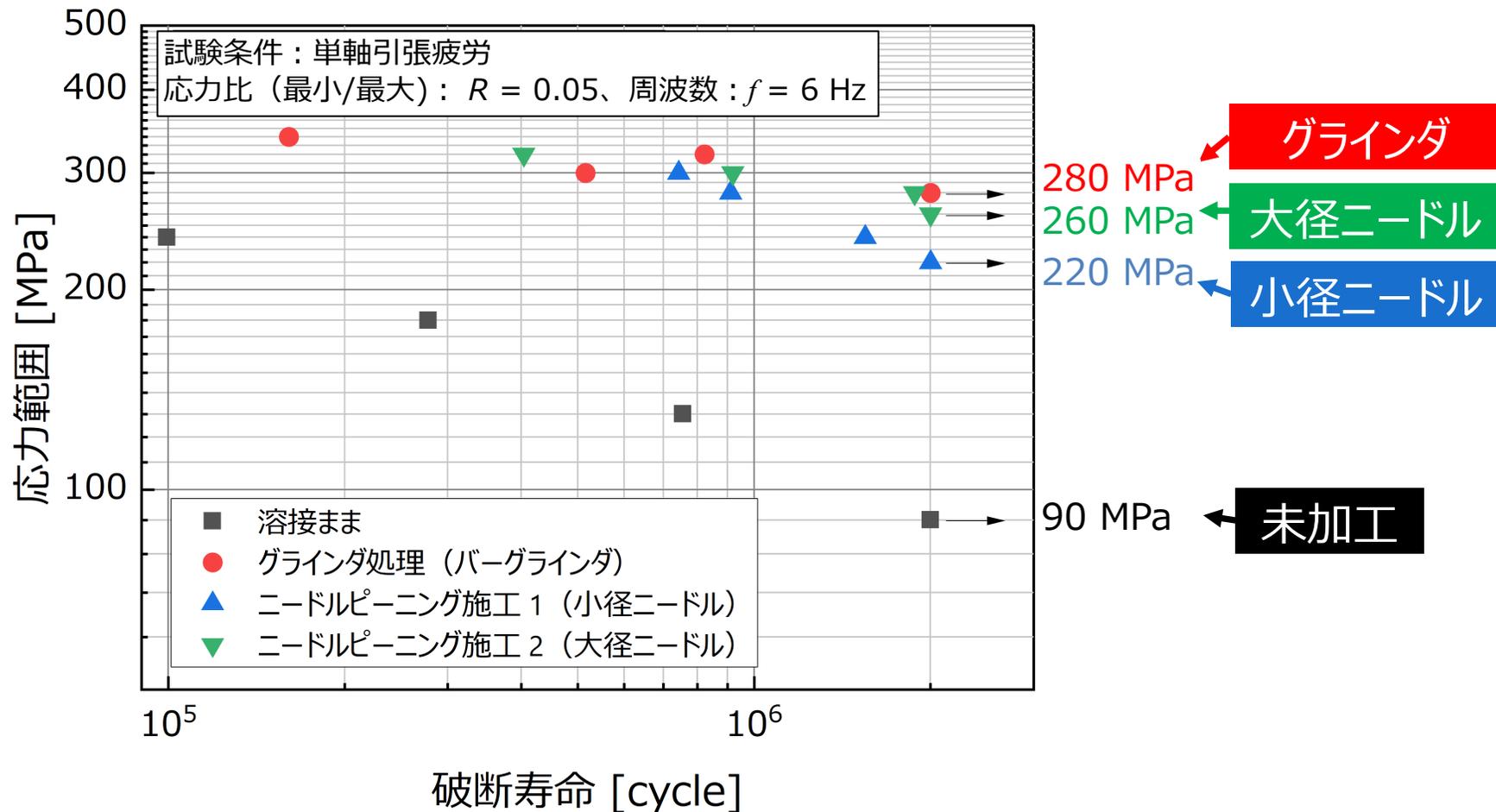


$\rho: 1.6 \text{ mm} < \rho: 6.0 \text{ mm} \cong \rho: 5.9 \text{ mm}$

# 新しいニードルピーニング法による疲労強度改善効果



疲労試験の様子



大径ニードルでのニードルピーニング施工により、  
グラインダ処理と同等の疲労強度を達成

## 研究紹介 2 : 接着接合の信頼性評価法

# 接着接合施工のメリット



作業内容	鉄鋼部材 + 溶接	軽量材置換 + 接着	コスト比較
搬送	クレーン等による運搬が必要。	小型クレーンあるいは人力による運搬が可能。	運搬方法による比較
取付	ジャッキ等で位置合わせした後、溶接による仮止めが必要。取付中、クレーンを占有する。	小型クレーンあるいは人力で位置合わせ可能。軽量のため、位置合わせが容易。	取付方法による比較
接合	溶接には高いスキルが必要。	接着のみ、あるいは接着と機械締めとの併用により、非ベテランでも作業可能。	作業単価による比較
変形修正	加工後に歪取り作業が必要。	なし	追加作業の有無による比較
その他	裏焼けの場合、再塗装工事が必要になる。	なし	追加塗装工事による比較

<適用例>

船用プロペラ

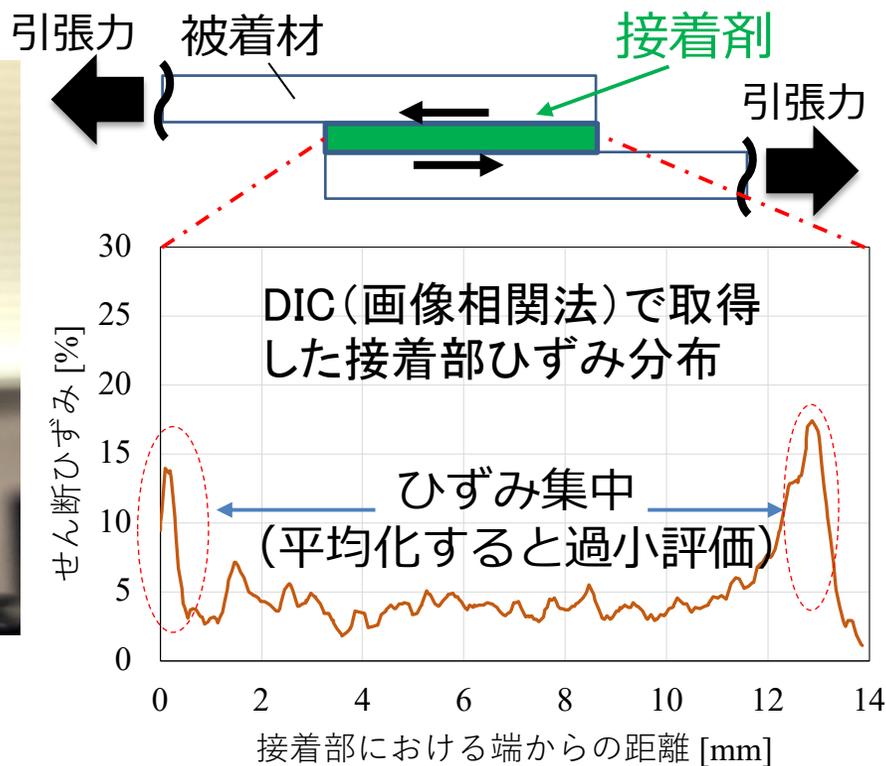
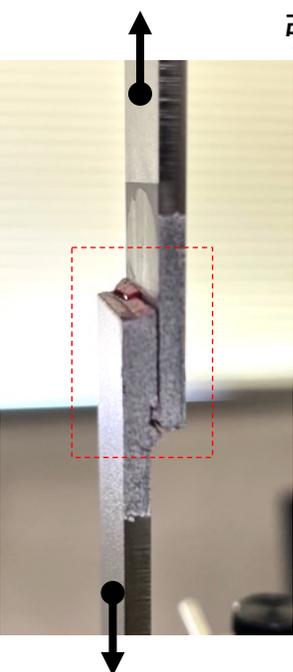
CFRP製  
ブレード  
銅製ボス



- 強度や耐久性などの設計手法の確立
  - 接着接合を用いることで、どの程度の安全性が確保できるか？
- 施工バラツキの抑制
  - どの程度の技能が必要か？施工手順や条件による影響はあるか？
- 環境劣化影響因子の定量予測
  - 海水暴露や紫外線暴露の影響を予測できるか？
- コストメリット
  - 従来溶接と比べて作業工数の削減は見込めるか？
  - 適用範囲が広いほど工数削減効果が見込めるか？

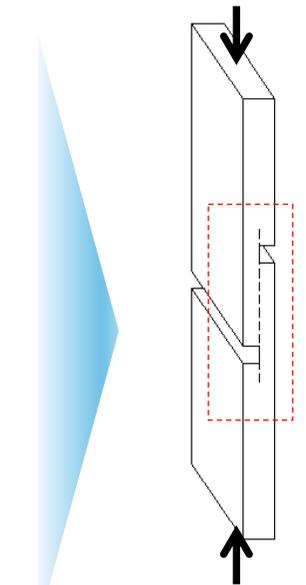
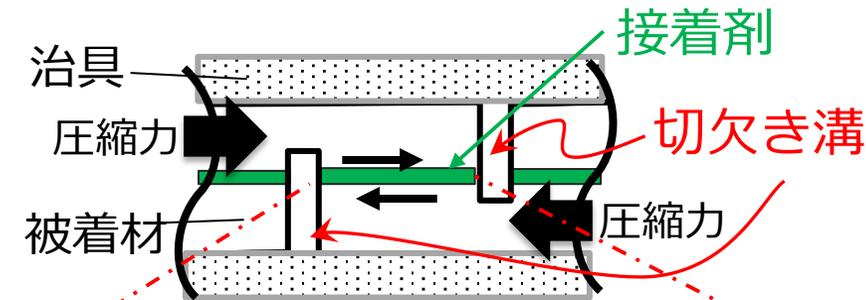
安全性を正確に見積もるため、信頼性評価がまずは重要

## 引張せん断試験 (従来型の規格認証試験法)

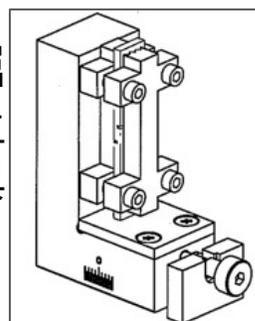


従来ラップシヤ引張試験では、接着両端部でひずみが集中し、純粋なせん断特性評価が出来ていないと考えられている。

## 新提案圧縮式せん断試験



座屈防止治具

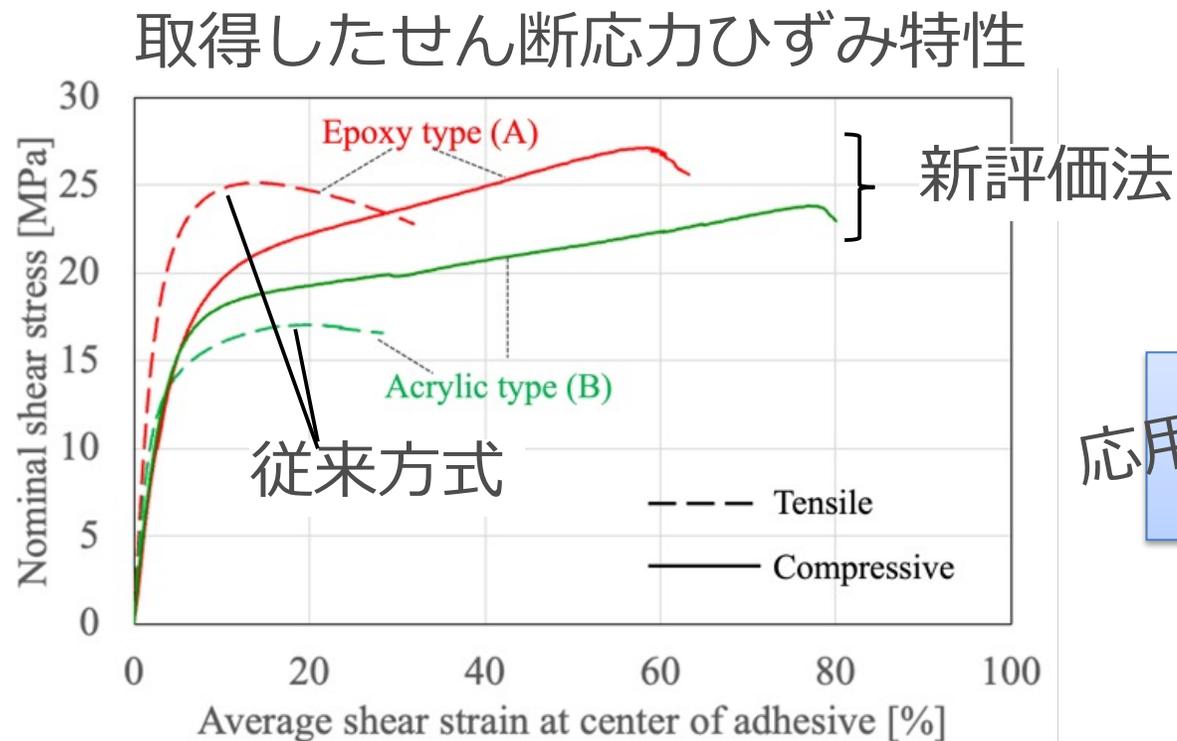


より均一なひずみ分布を取得でき、正確なせん断特性評価が可能

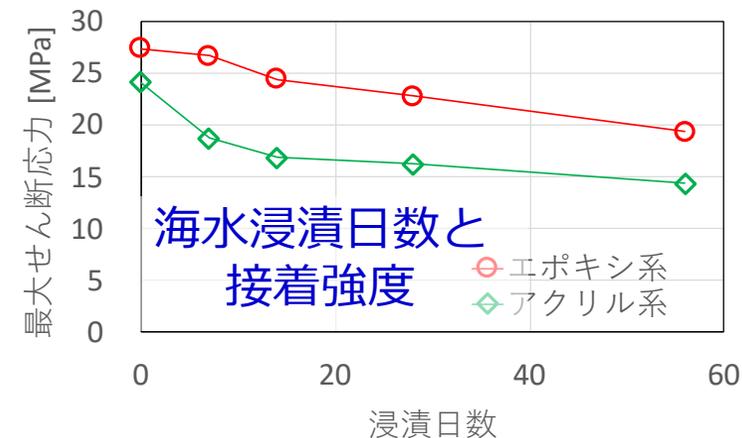
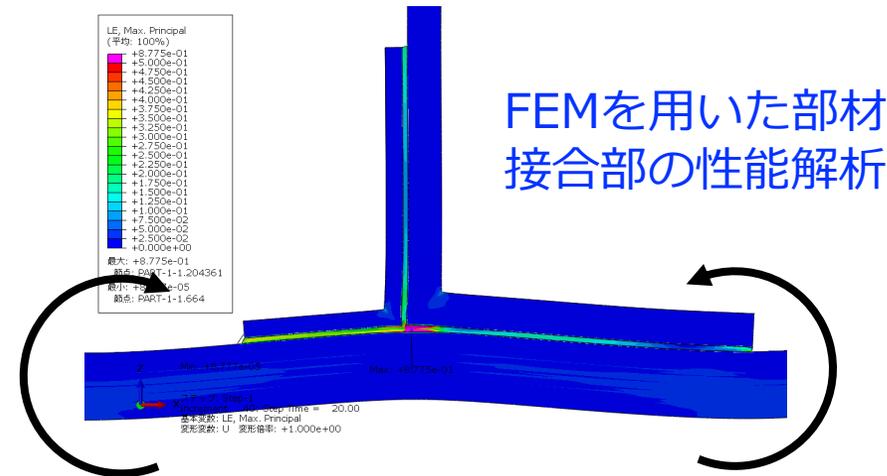
ref) 松尾, 岩田, 秋山, 山磨, 櫻井, 井上, Proc. JCCM14, 2C-11 2023.3

T. Matsuo, T. Iwata, S. Akiyama, T. Yamatogi, T. Sakurai, T. Inoue, 14<sup>th</sup> EURADH, 2023.9.

# 新しいせん断特性評価法による効果



応用展開



接着剤の特徴的な非線形特性を検出できる

→ 試験法として規格化、標準化を目指す

→ 接合設計や環境影響評価を高精度に実現可能

- 横軸：せん断ひずみ…DICにより求めた接着全域のひずみ平均値
- 縦軸：せん断応力…圧縮荷重を接着面積で除した公称応力

# 研究紹介 3 : FRP接着施工による補強・補修

# CFRP（炭素繊維強化プラスチック）による 補修施工のメリット



FPSO（浮体式生産貯蔵積出設備）の腐食



スプラッシュゾーン  
における腐食の例

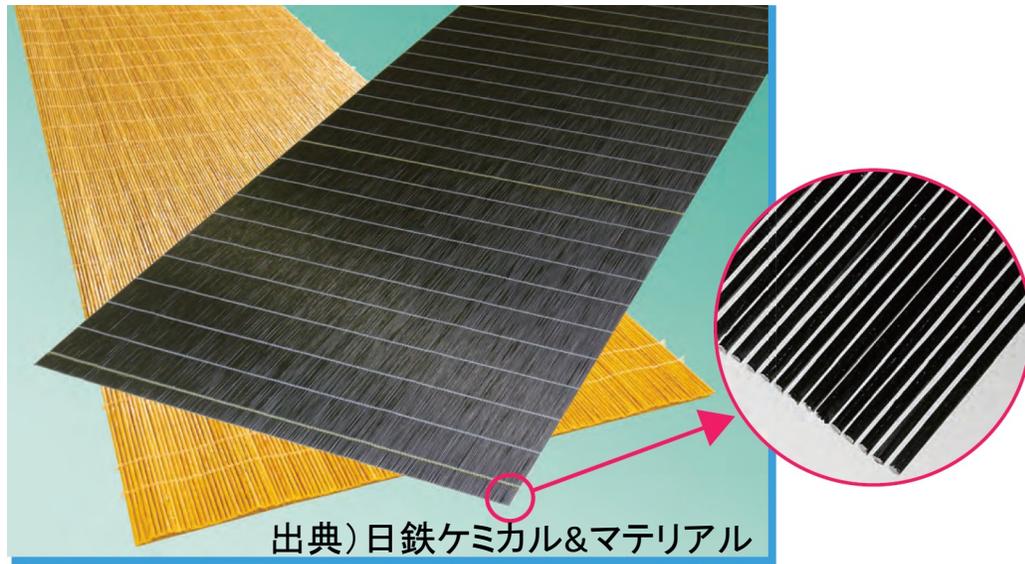
Ref) C. Paillusseau, at el. Gamechanging Structural Repair  
Solution for FPSO Hulls with No Hot Work, SPE-190897 (2018)



浮体にアクセスし  
ているイメージ

- 修理のためにドックに曳航するのは運用コストアップになり、特に浮体設備においては現実的ではない  
→ 現場での施工・修理が必要
- 溶接による補修は大型装置や熟練工が必要であり時間とコストがかかる  
→ 作業性の優れる施工技術が必要

# CFRP（炭素繊維強化プラスチック）による 補修施工のメリット



出典) 日鉄ケミカル&マテリアル  
製品カタログ“ストランドシート工法”

陸上構造物ではすでに実用化されている！

- CFRPストランドをすだれ状にシート化
- 含浸作業や脱泡作業が不要な専用接着樹脂

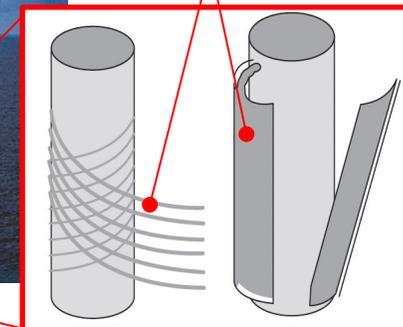


1. 繊維直進性が良く高品質
2. 樹脂流れが無く、作業性が高い



施工作業イメージ

CFRPシート



陸よりもさらに過酷な浮体の  
施工環境においても有望！

橋梁／床板

鋼トラス橋／斜め材



# CFRP積層板の吸水影響予測

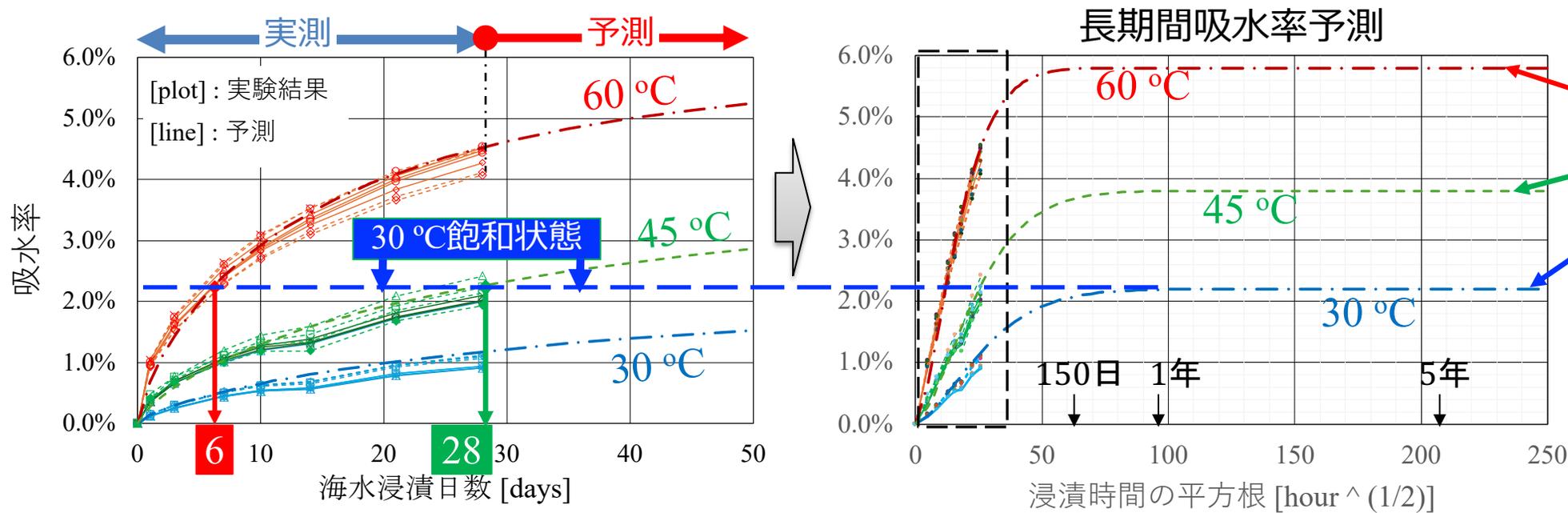


ref) T. Matsuo, A. Sakurai, F. Yanagimoto, Y. Hidekuma, S. Sakurai, OMAE2025, 2025.6.

## ■ 吸水に及ぼす温度の影響と加速試験法

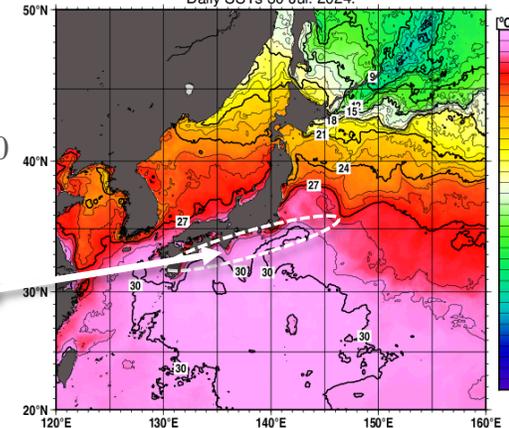
$$\text{拡散方程式 (Fick's law)} : c = c_{max} \cdot \left[ 1 - \exp \left( -7.3 \left( \frac{D_m \cdot t}{h^2} \right)^{0.75} \right) \right]$$

$c$ : 吸水率,  $c_{max}$ : 飽和吸水率,  $D_m$ : 拡散係数  
 $t$ : 経過時間,  $h$ : 試験片厚さ



	$c_{max}$	$D_m$
60 °C	5.8 %	0.002
45 °C	3.8 %	0.001
30 °C	2.2 %	0.0008

日本近海の夏場の海水温分布  
Daily SSTs 30 Jul. 2024.

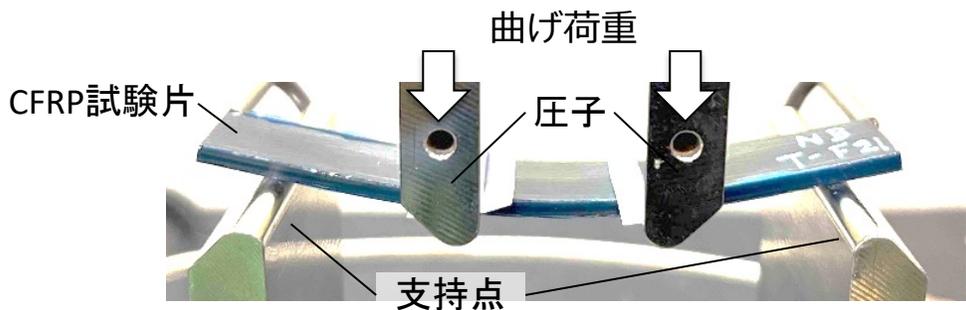


- 拡散方程式により、各水温における吸水傾向を把握
- 日本周辺海域（夏場水温30°C程度）を想定した長期運用時の最大吸水率を予測
- 吸水率が同等になる条件：30°C 飽和状態 = 60°C 6日間 = 45°C 28日間

30 °C

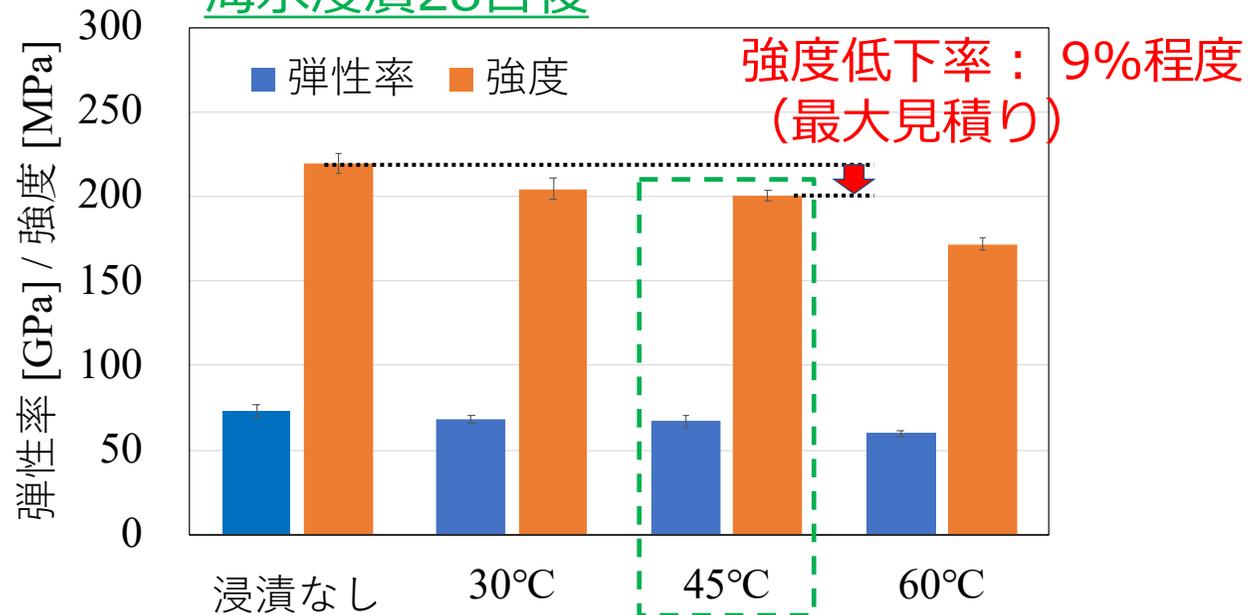
## ■ 吸水と材料特性の関係

4点曲げ試験により特性比較



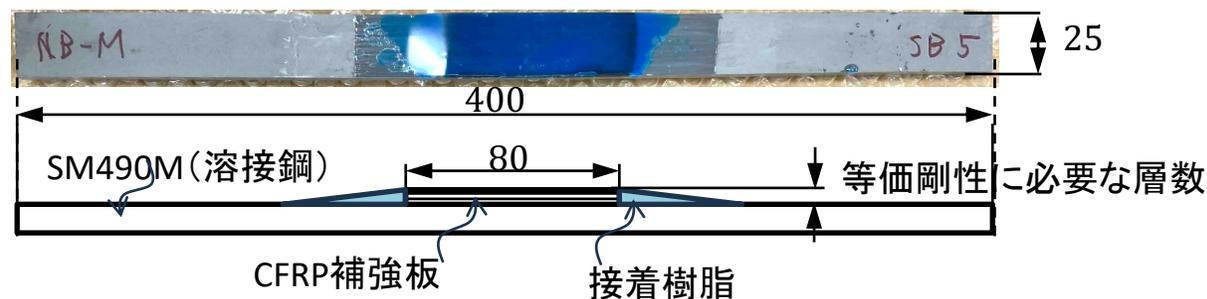
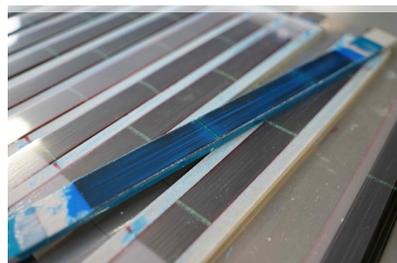
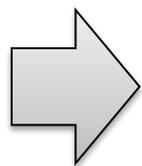
ref) T. Matsuo, A. Sakurai, F. Yanagimoto, Y. Hidekuma, S. Sakurai, OMAE2025, 2025.6.

海水浸漬28日後



加速試験により、30 °C飽和吸水状態を再現した場合の強度低下率（長期運用後の強度下限値）を予測可能

鋼板試験片にCFRP補強施工

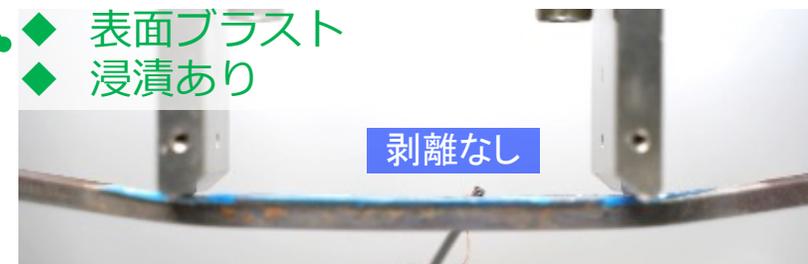
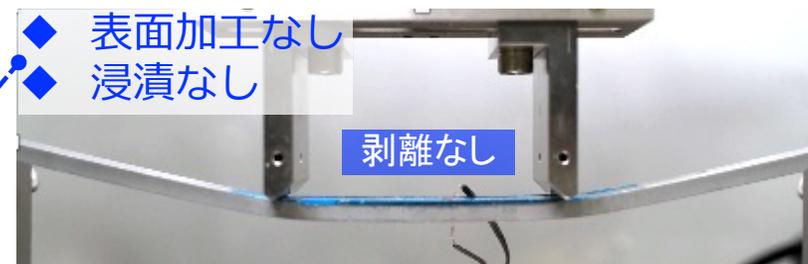
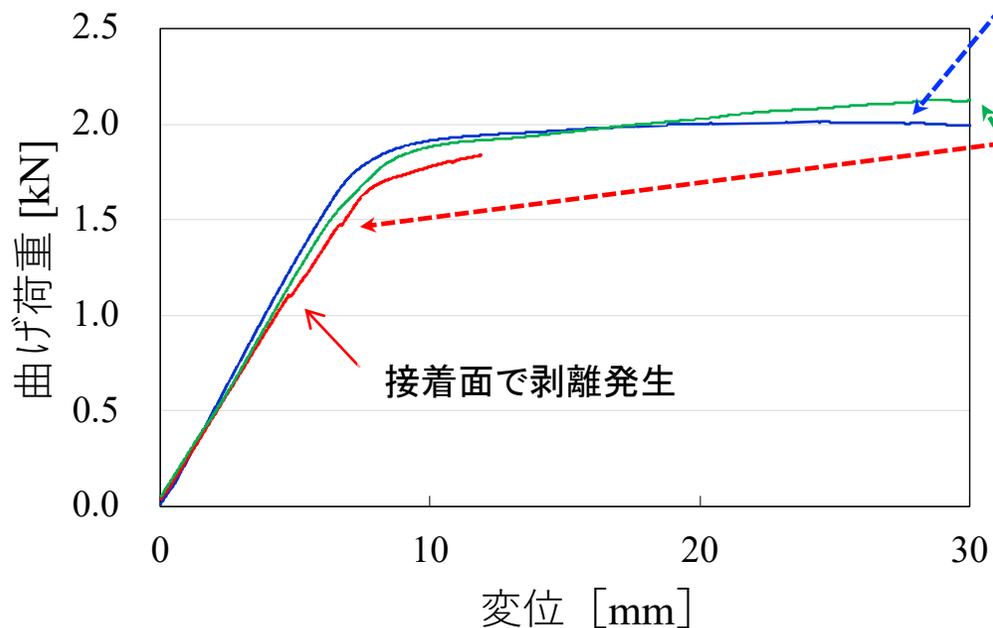
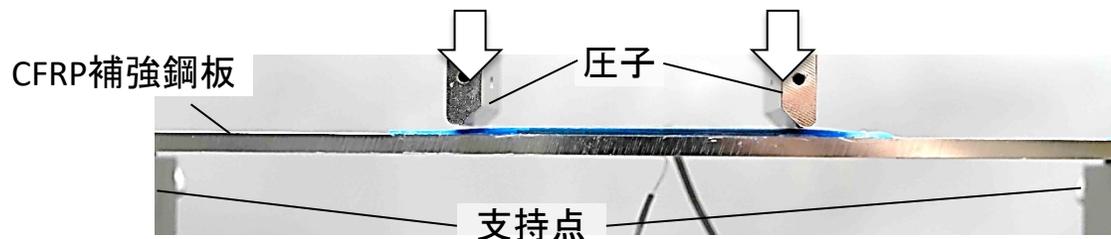


# CFRP補強による鋼板接着面の性能評価

## ■ 補強効果の確認

ref)T. Matsuo, A. Sakurai, F. Yanagimoto, Y. Hidekuma, S. Sakurai, OMAE2025, 2025.6.

4点曲げ試験により、表面加工と浸漬（60℃、6日間）の影響を比較



表面ブラスト加工によって、浸漬した場合でも剥離が生じにくく、十分な性能を発現できる

1. 背景
2. 研究テーマピックアップ
3. 研究紹介 1 : 溶接部ニードルピーニング
4. 研究紹介 2 : 接着接合の信頼性評価法
5. 研究紹介 3 : FRP接着施工による補強・補修
6. まとめ

## 1. ニードルピーニングによる溶接部の疲労強度改善

- ニードルの大径化と施工方法の最適化により、鋼船規則の規定に準じた止端形状を付与することに成功し、従来グランド処理と同等の疲労強度を達成することができた。

## 2. 接着性能評価法

- 新たに提案する圧縮式せん断試験法により、接着部の純粋なせん断特性を取得できる見通しを得たことで、接合設計や環境劣化評価の信頼性向上に貢献できる。

## 3. FRP接着施工による補強・補修

- FRP補強材として、長期海水暴露の影響を予測する加速試験法を提案した。
- 加速試験法を活用して、鋼板補強におけるFRP接着部の海水暴露の影響を明らかにした。

今後：いずれの施工法および評価技術を活用し、実用部位における実作業工数と安全性を評価した上で、規則・ガイドライン等標準化を目指す

ご清聴ありがとうございました



国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
**海上技術安全研究所**  
National Maritime Research Institute

