

金属素材の接着接合技術

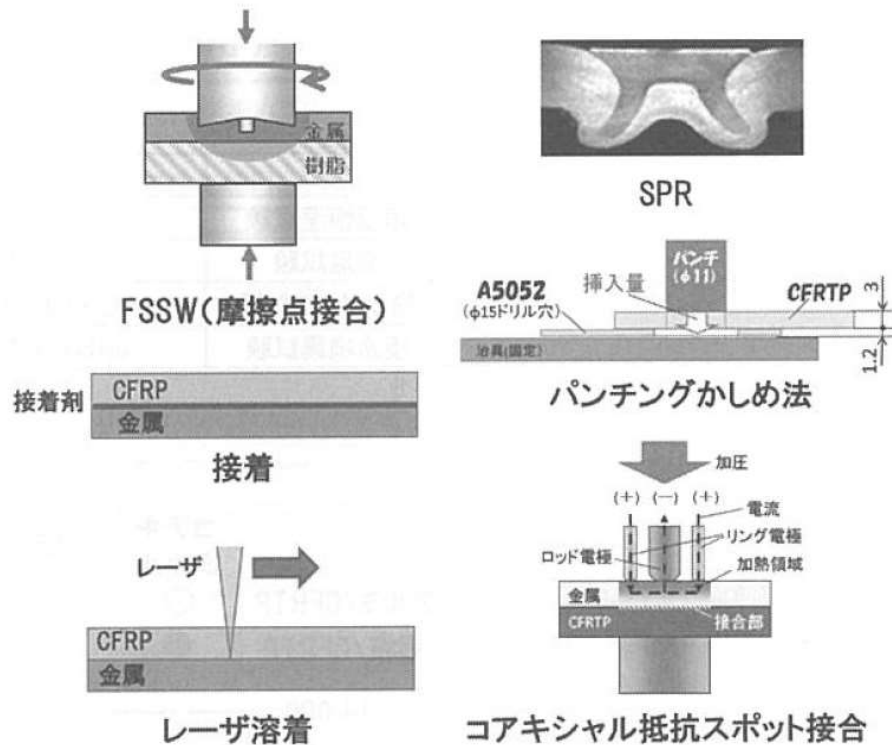
株式会社神戸製鋼所 材料研究所
表面制御研究室 高橋佑輔₁

1. はじめに
2. 金属素材の接着接合
3. 接着強度の影響因子
4. 接着の強度低下とメカニズム
5. おわりに

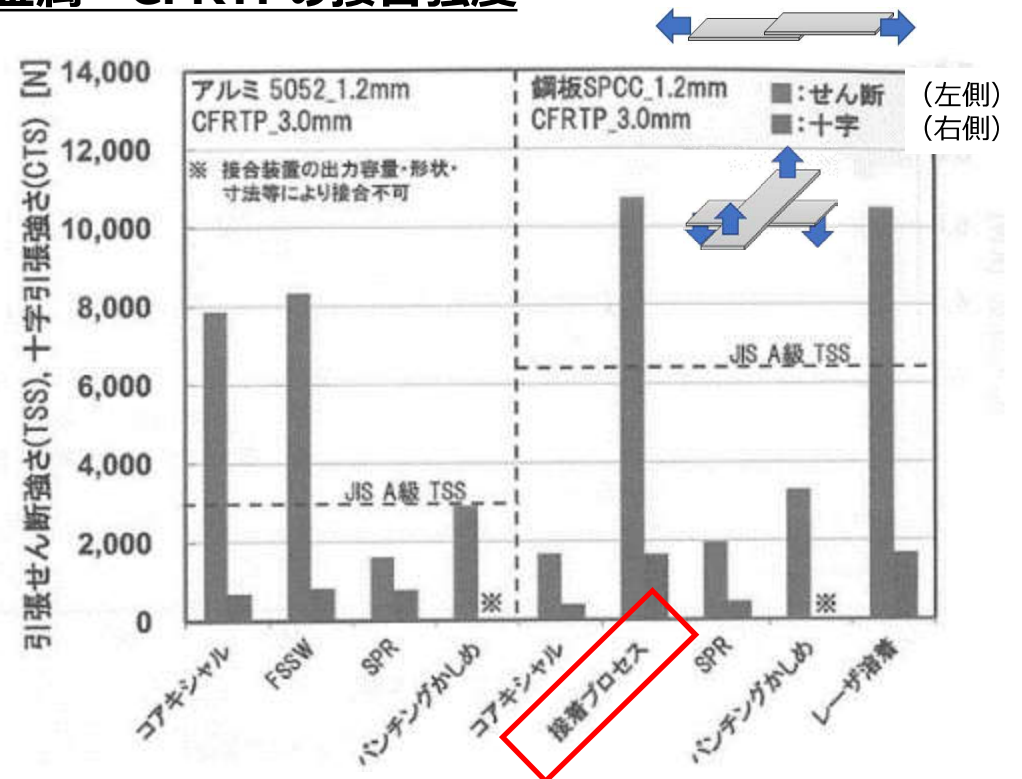
1. はじめに
2. 金属素材の接着接合
3. 接着強度の影響因子
4. 接着の強度低下とメカニズム
5. おわりに

素材の種類を選ばずに接合が可能

■ 異種材料の接合技術



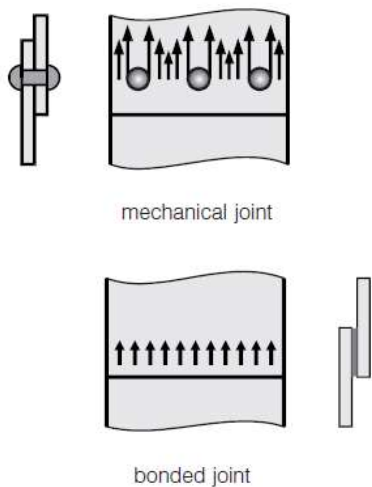
■ 金属 – CFRTPの接合強度



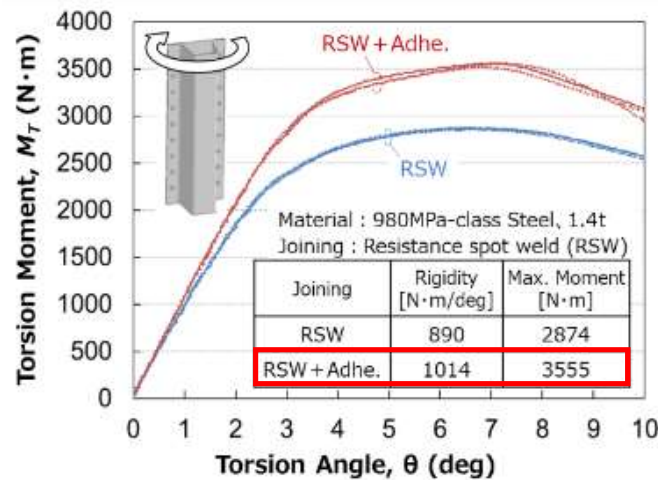
※平田, 溶接学会誌, 2020, 89, 11. 4

接合面積が大きく応力集中の緩和により、剛性や衝突エネルギー吸収性が向上する

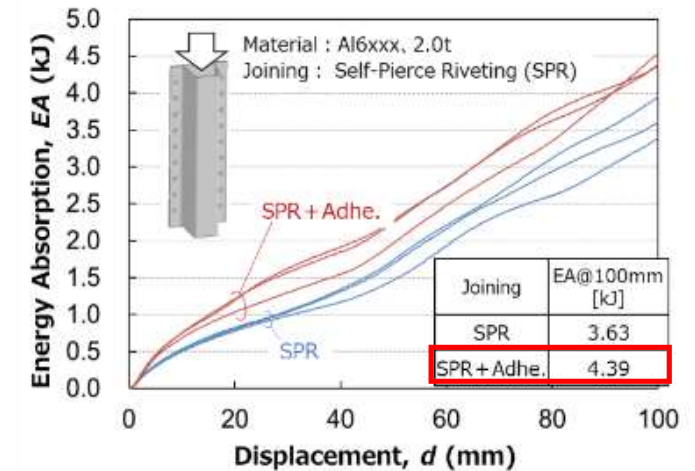
■ 接合方法と応力集中の違い



■ ねじり剛性



■ 衝突エネルギー吸収量



※伊原ら, 神戸製鋼所R&D技報, 2019, 69, 82.

※“EAA Aluminium Automotive Manual - Joining 9. Adhesive bonding”, European Aluminium Association, p. 38 (2015).

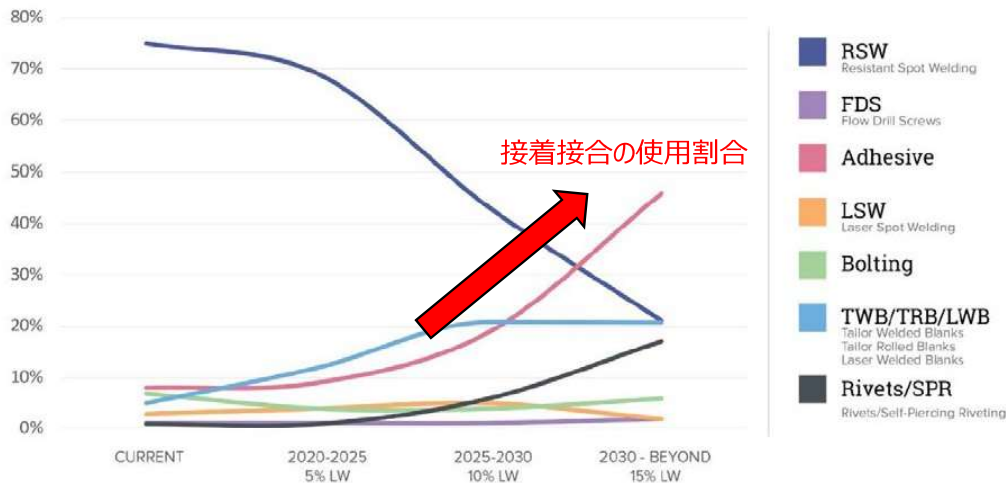


(c) 変形領域の拡大図
(c) Enlarged view of deformed domain

接合部が開口せずに折り畳まれることでより多くの変形エネルギーが必要になる

自動車素材のマルチマテリアル化に伴い、接着接合技術の重要性が高まると期待される

■ 自動車の軽量化と接合技術動向予測



Note: LW= Lightweighting
Source: CAR Research, Lucintel

※S, Brett et al. 2017. Technology Roadmaps, Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI

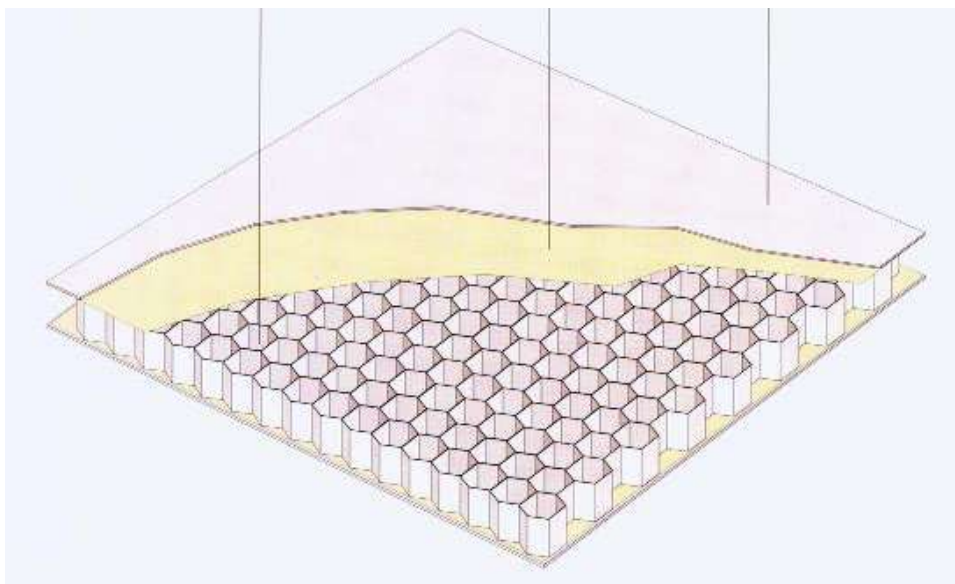
■ 自動車1台あたりに使用される接合技術

(1台あたり)	異種材接合法						同材接合法			
	SPR	SSR	FDS	ImpAct	FEW	TOX	構造用接着剤 (m)	アルミ抵抗 Spot	鋼抵抗 Spot	レーザ (m)
欧州A社	331		20	80		202	188	316	4,411	12.9
欧州B社	2,578	277	604		105	175	200		2,911	Al:6.1 Fe:3.1
米国C社	2,270		196			120	113	98		3.3
米国D社	357		745				293	1,821	1,624	Al:7.4

※弊社調べ

鉄道車両には軽量・高剛性なアルミハニカムパネルが使用されている

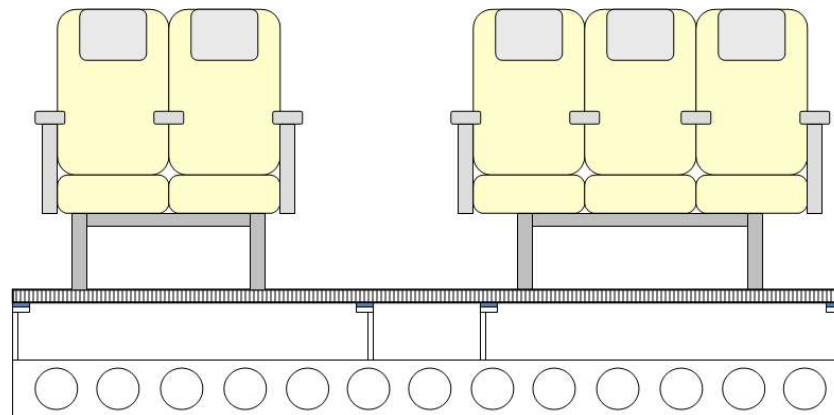
アルミハニカムコア 構造用接着剤 アルミ板



軽量

高剛性

平坦



※神鋼ノースホームページより抜粋

採用実績

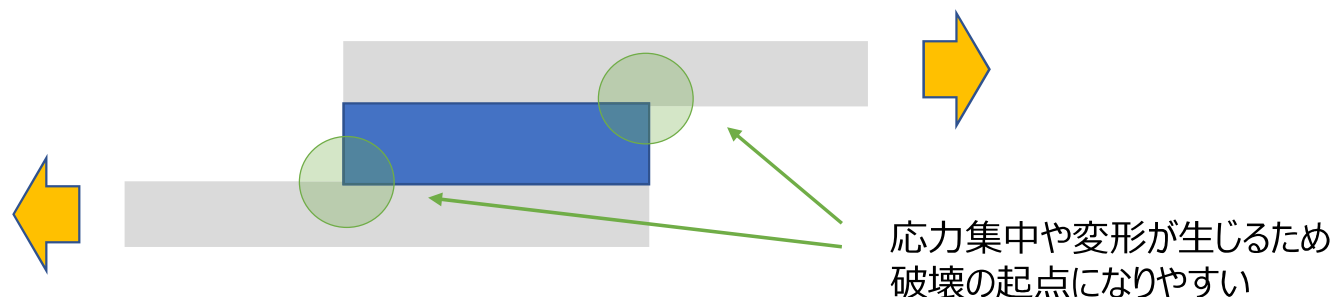
E1系、E2系、E3系、E5/H5系、E6系、E7/W7系

700系、923系、N700系、N700A系、N700S系

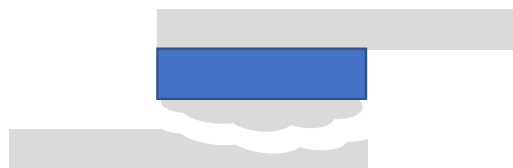
500系、800系、700T系、700/N700系レールスター ほか

1. はじめに
2. 金属素材の接着接合
- 3. 接着強度の影響因子**
4. 接着の強度低下とメカニズム
5. おわりに

接合端部の脆弱箇所から破壊される



被着材表面破壊
(表面の強度が低い)

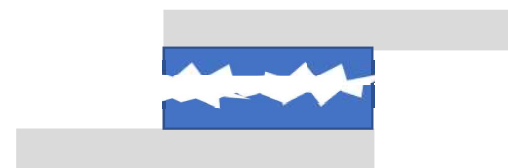


界面破壊
(接着剤との相性が悪い)



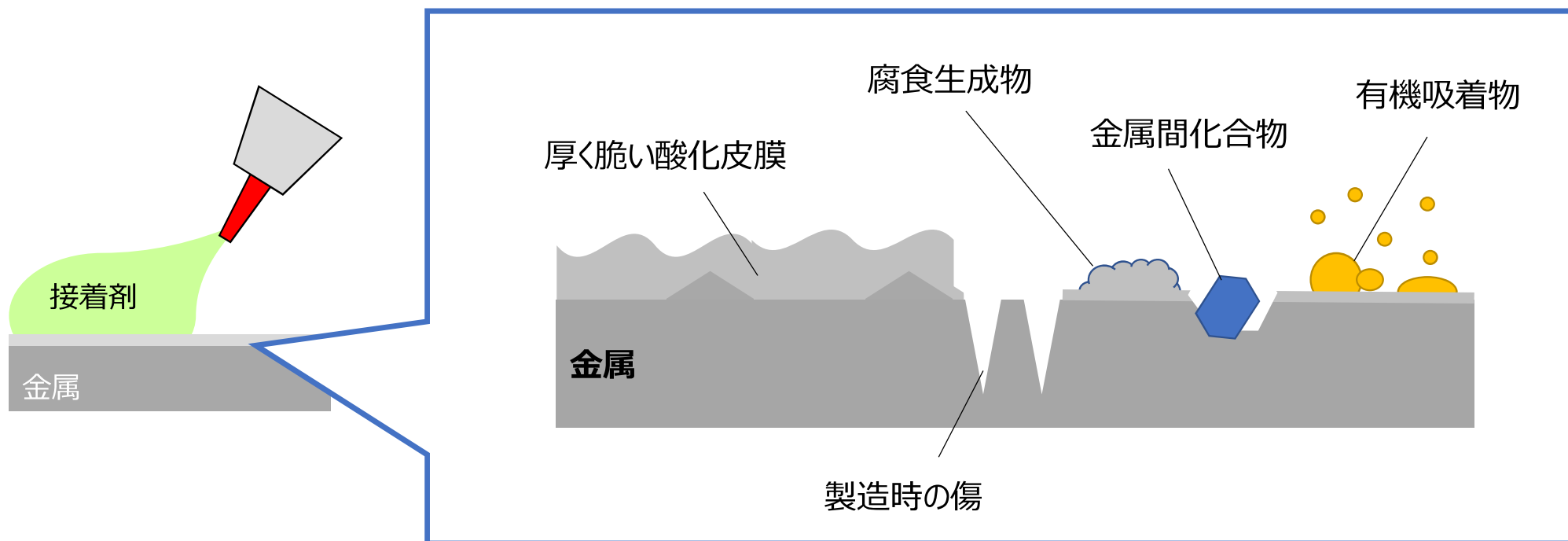
強度が安定しない (被着材表面状態の改善が必要)

凝集破壊
(接着剤との相性が良い)



強度が安定

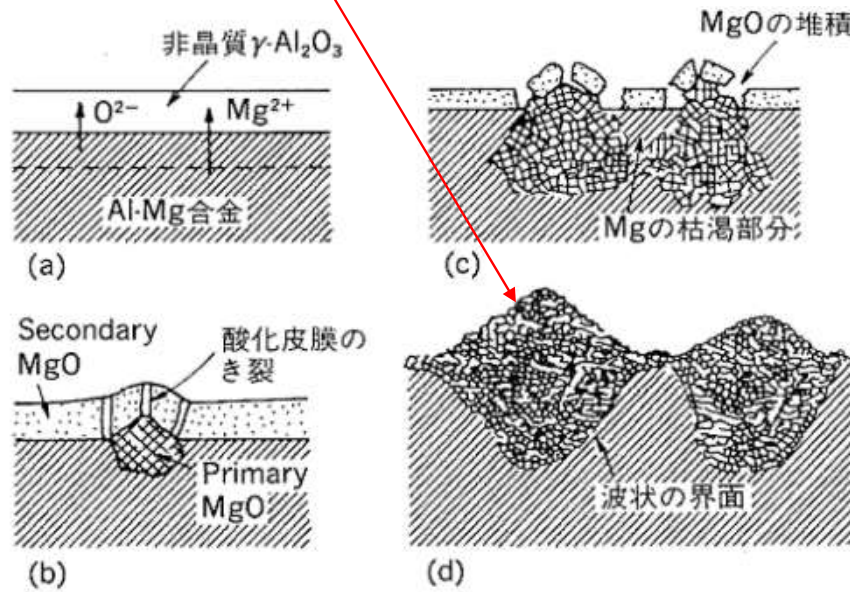
金属を接着するにはその表面状態が重要になる



※村川, 表面技術, 1994, 45, 752.

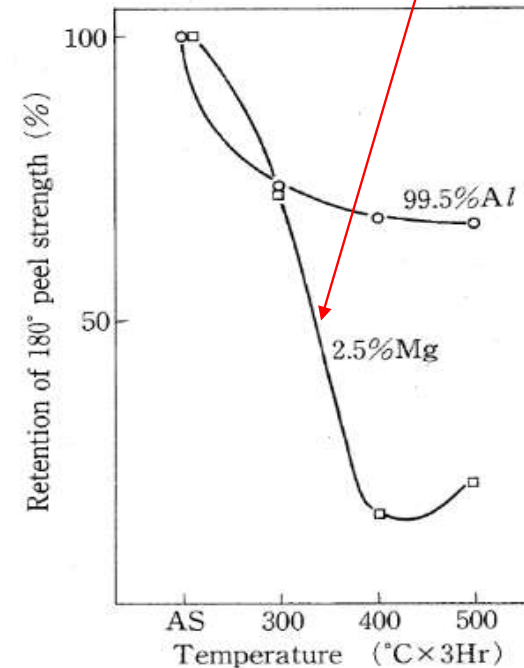
マグネシウムを含むアルミニウム合金では酸化皮膜の強度が影響する

熱処理によりマグネシウム酸化物が表面に濃化する



(a) 酸化の初期段階, (b) MgOの形成と非晶質皮膜の破壊, (c) MgOの凝集化・堆積, (d) 波状の界面の形成

酸化皮膜が脆く接着強度が著しく低下するため、接着前にエッチングなどの除去処理が必要



※豊瀬ら, 軽金属学会第67秋期大会講演概要, 1984, 18.
 磯山ら, 軽金属, 1985, 35, 176.

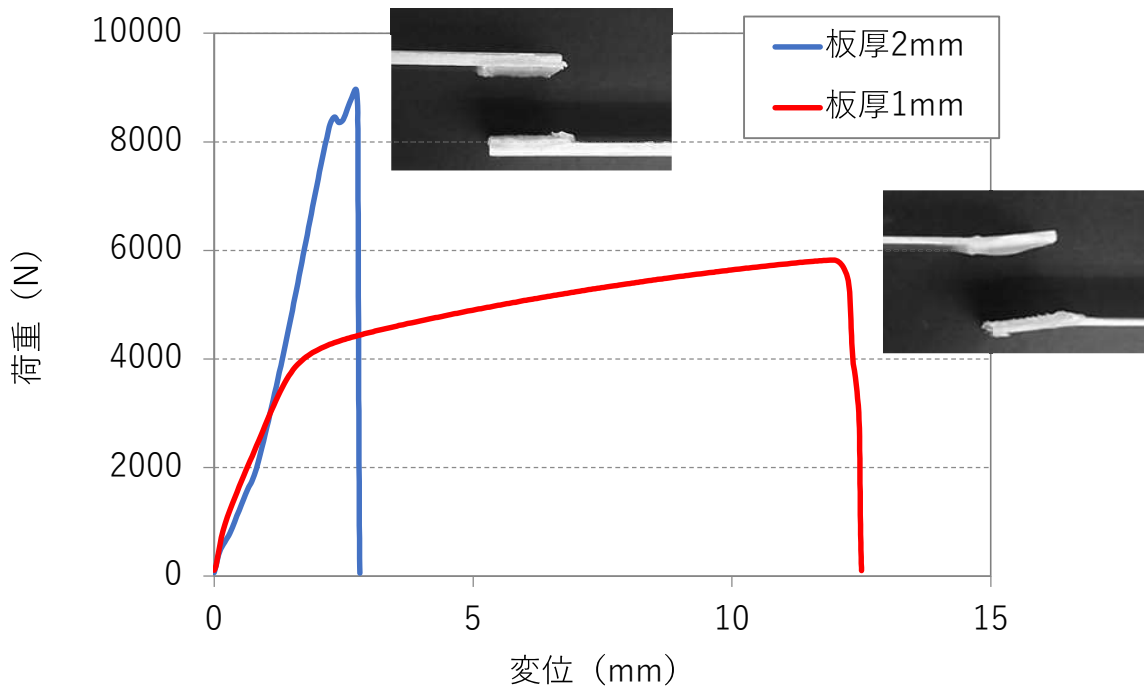
※宇佐見ら, 住友軽金属技報, 1993, 34, 171.

被着材の機械特性の違いによる強度特性の変化

被着体の機械特性により変形挙動が異なり、接合強度に影響する

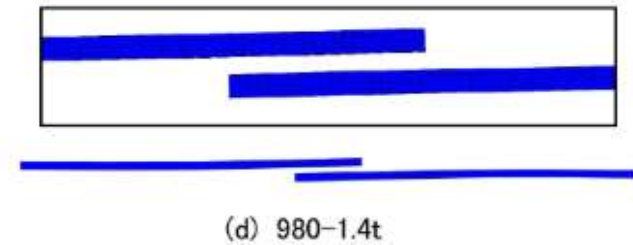
■ 板厚の異なるアルミニウム合金の接着強度

(6000系アルミニウム合金, エポキシ接着剤使用)

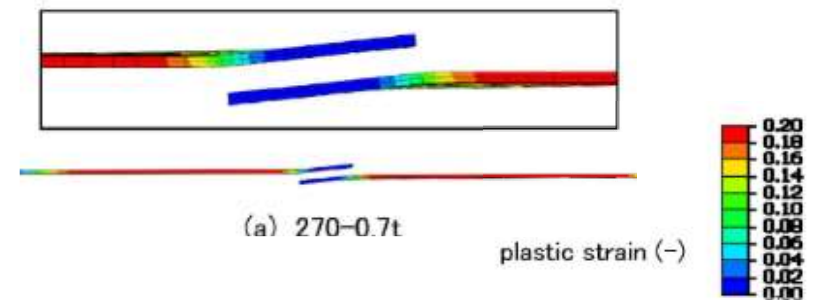


■ 強度・板厚の異なる鋼板の変形シミュレーション

接合部の変形が少なくせん断方向の応力が支配的



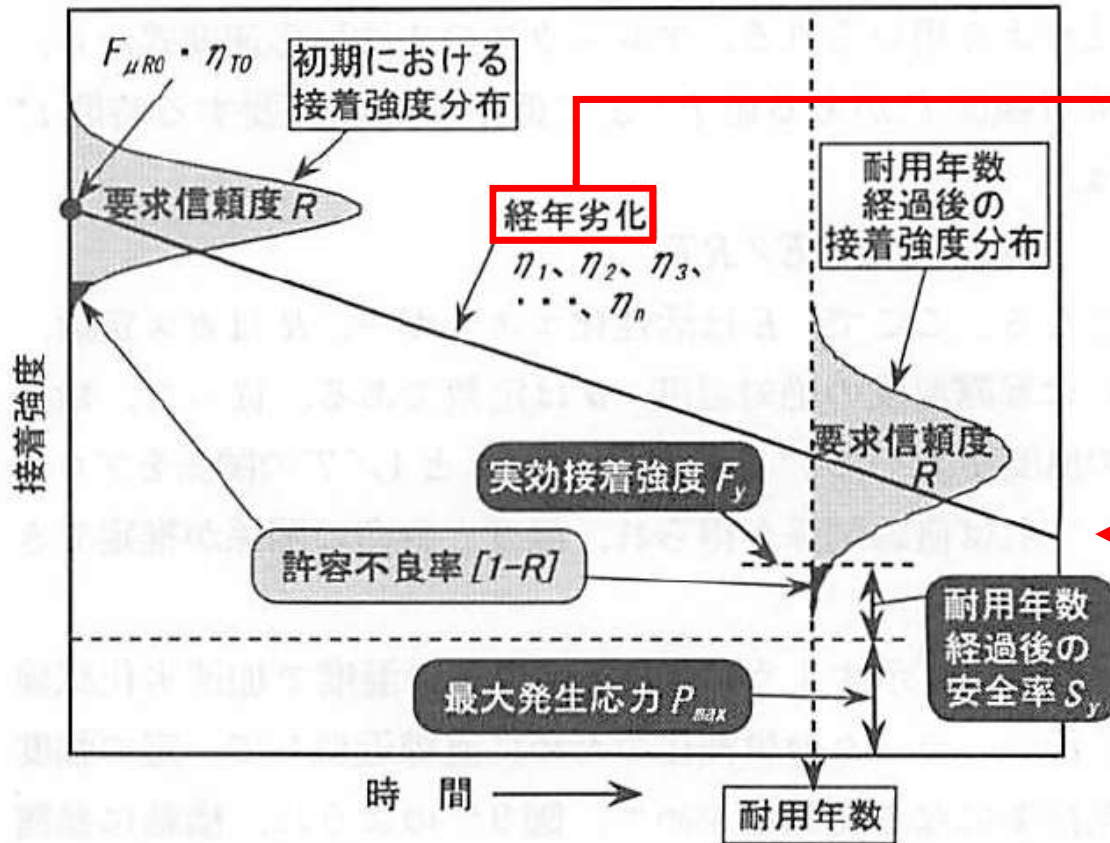
被着材の変形により応力集中や剥離荷重が発生



※富士本ら, 溶接学会論文集, 2016, 34, 93.

接着強度の耐久性

使用環境でどの程度の強度が維持できるかが強度設計において重要



水、塩、温度変化、紫外線、酸-アルカリなど



接着剤や接着界面（金属表面）の状態変化

※原賀, 日本接着学会誌, 2007, 43, 319.

塩水を使用する環境で強度低下が大きく金属表面の状態変化の影響が考えられる

■ 高温恒湿試験 (80℃, 95%RH)

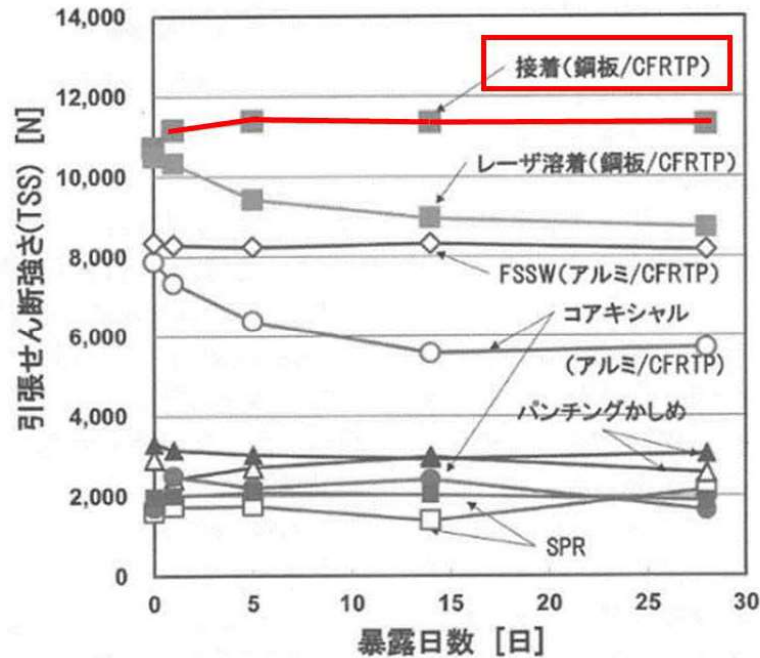
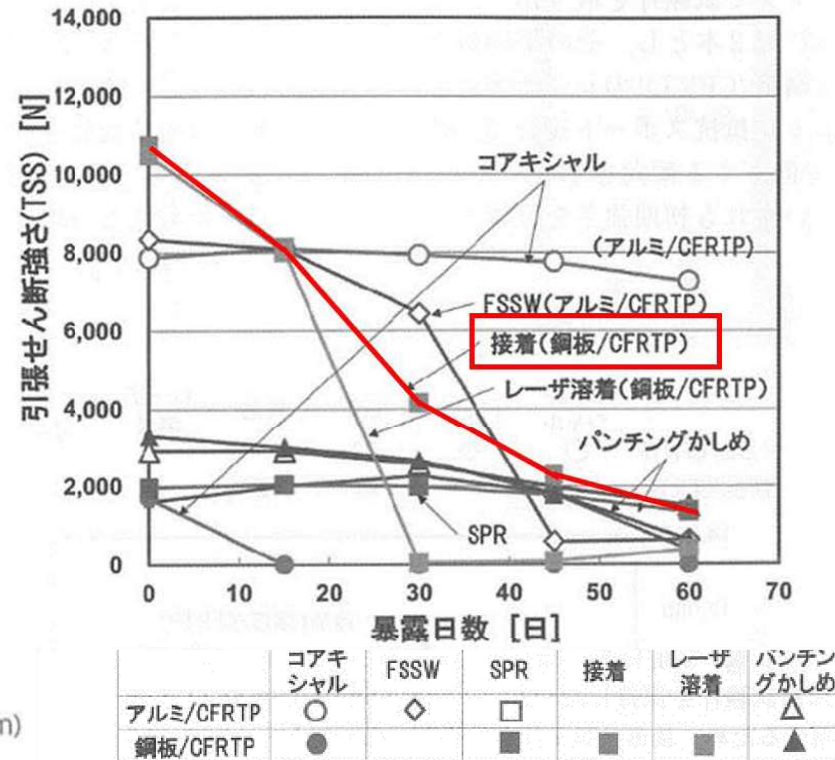


図 11 恒温恒湿環境における金属/CFRTPの異材接合継手の引張せん断強さ (アルミ 5052_1.2mm/CFRTP_3.0mm, 鋼板 SPCC_1.2mm/CFRTP_3.0mm)

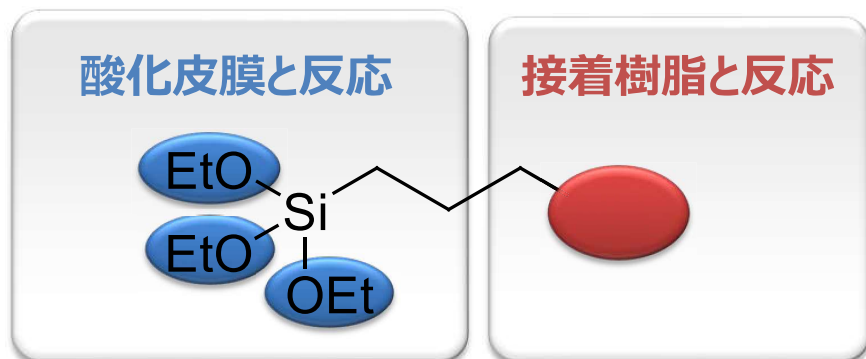
■ 塩水噴霧試験 (JASO M610-92)



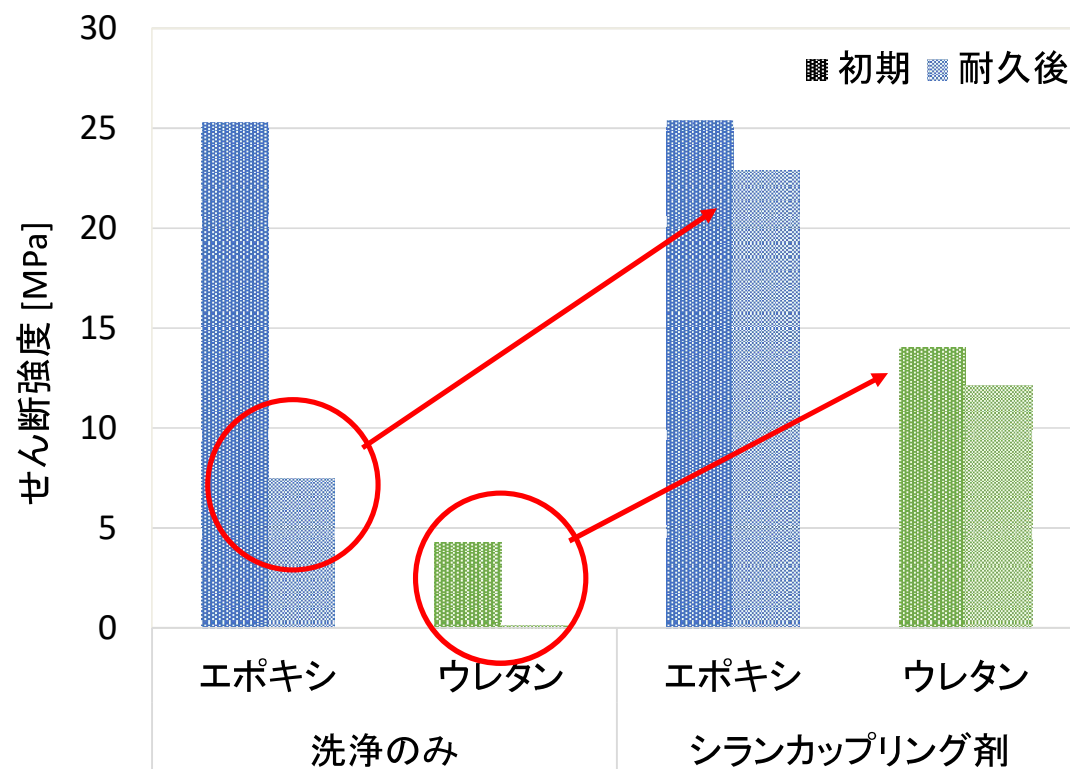
表面処理による強度低下の抑制例

金属と接着剤の相互作用を強化することにより接着性や耐久性は改善される

(6000系アルミニウム合金, 耐久試験: 5%塩水浸漬2週間)



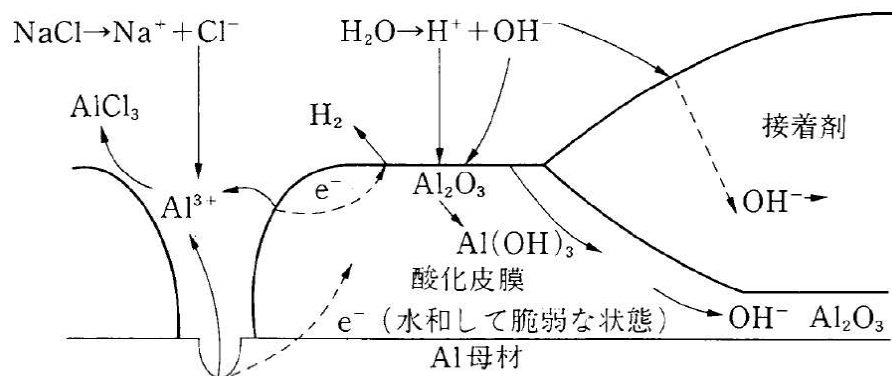
表面処理を実施するには被着材の金属表面や接着樹脂との相性が重要



接着剤の改良によるアプローチもなされている

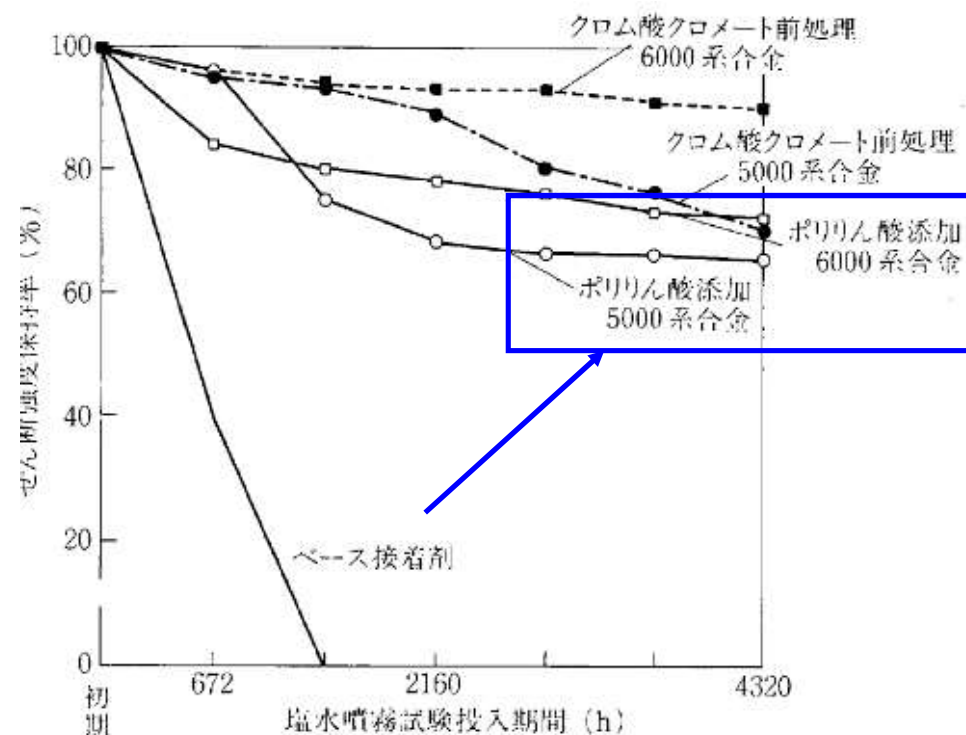
■ 接着界面の推定劣化メカニズム

塩水による酸化皮膜の破壊



カソード反応によるアルカリ化

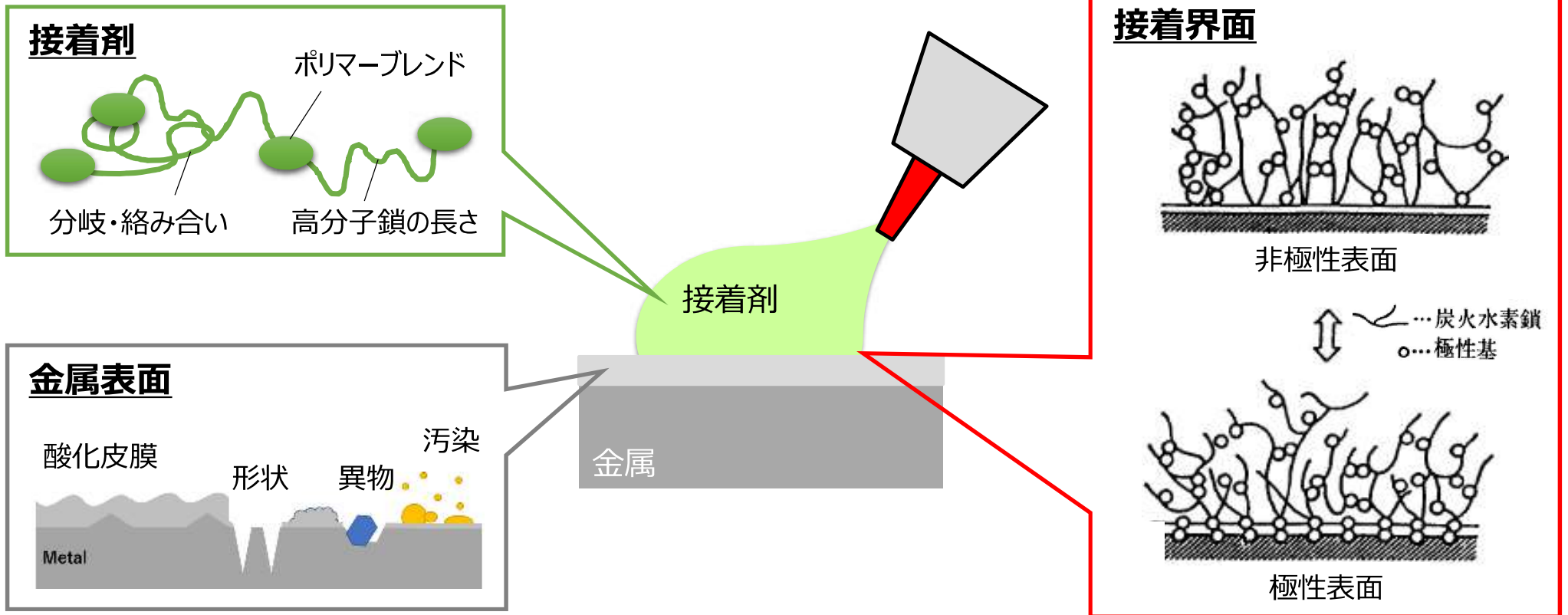
■ 添加剤による接着耐久性の変化



1. はじめに
2. 金属素材の接着接合
3. 接着強度の影響因子
- 4. 接着のメカニズム**
5. おわりに

接着界面の状態を考える

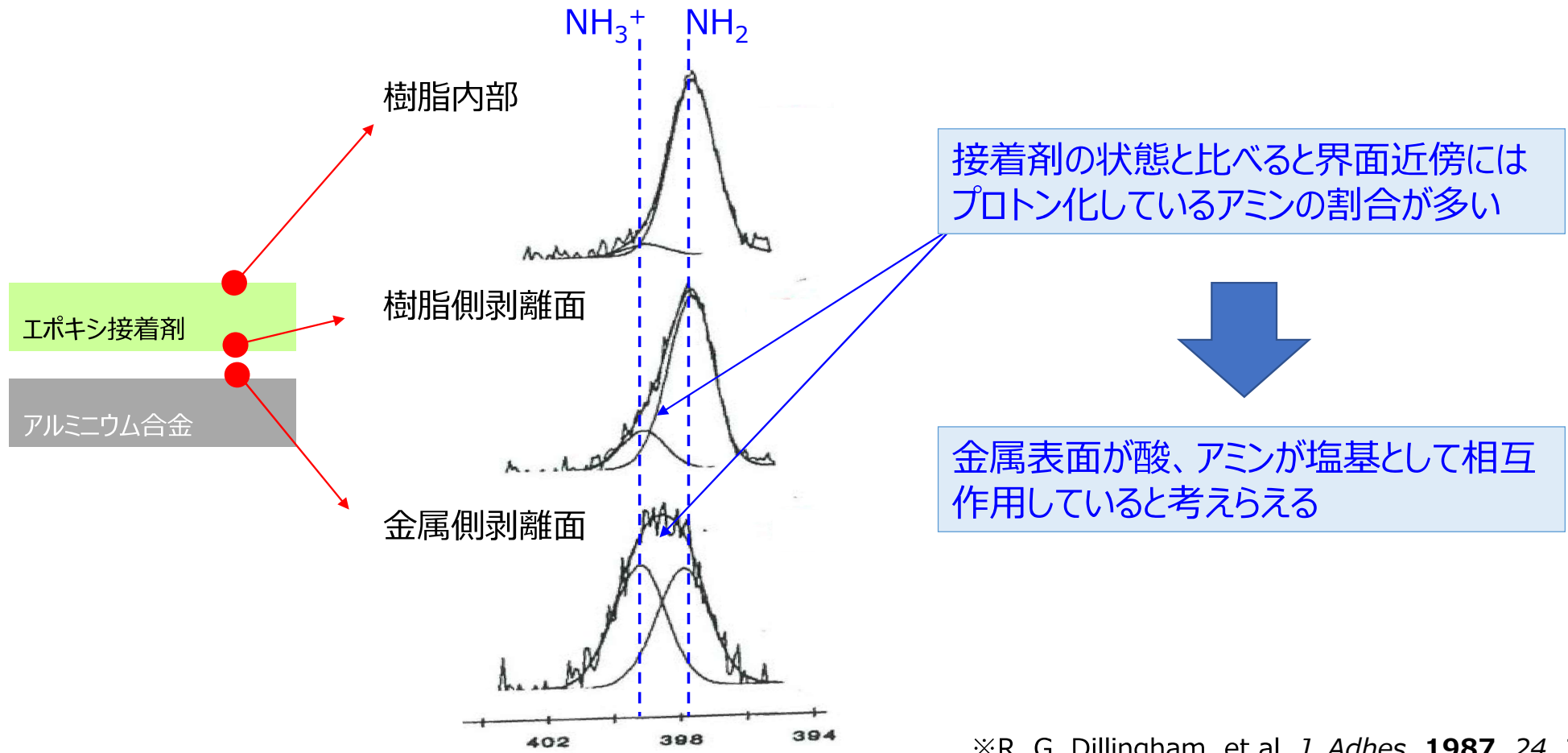
金属素材の接着性は金属の表面状態や極性、官能基と接着剤分子との相性が重要



※村川, 表面技術, 1994, 45, 752.

アミン硬化型エポキシ接着剤界面の分析例 (1)

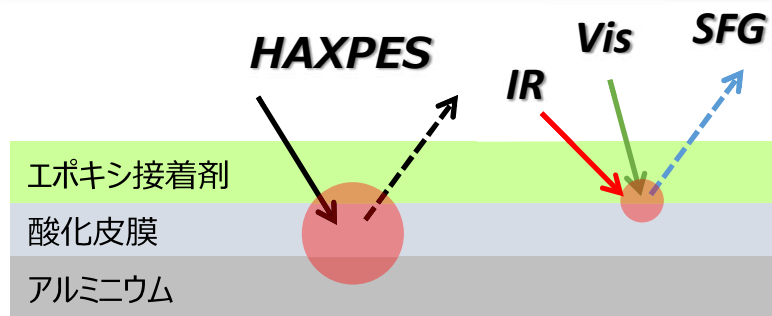
接着剤内部と界面では接着樹脂の化学状態が異なる可能性がある



※R. G. Dillingham, et al. *J. Adhes*, **1987**, 24, 315. ¹⁹

アミン硬化型エポキシ接着剤界面の分析例 (2)

接着界面では接着剤分子からアルミニウム表面への電子供与がみられている



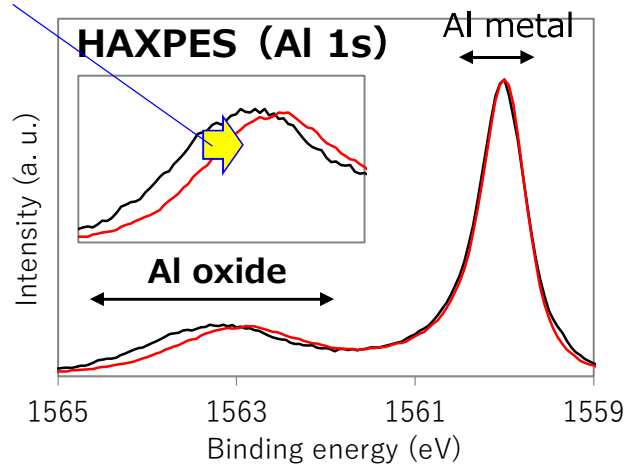
【HAXPES：硬X線光電子分光法】

接着剤を塗布したままの金属表面の状態解析が可能

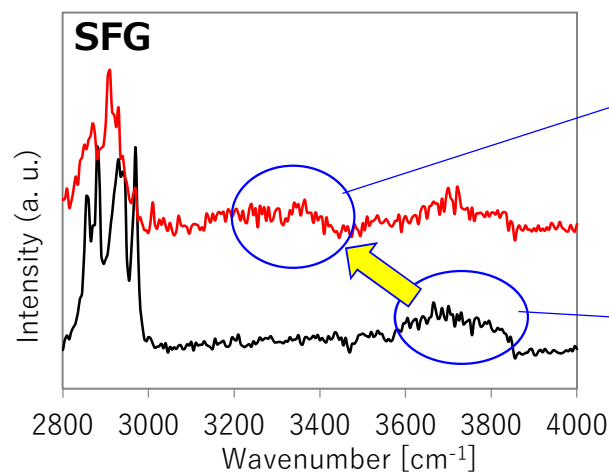
【SFG分光法：和周波発生分光法】

接着界面における分子の配向状態を分析

接着剤の塗布によりアルミ酸化皮膜の電子状態が低エネルギーシフト



— Aluminium alloy — Aluminium alloy + adhesive



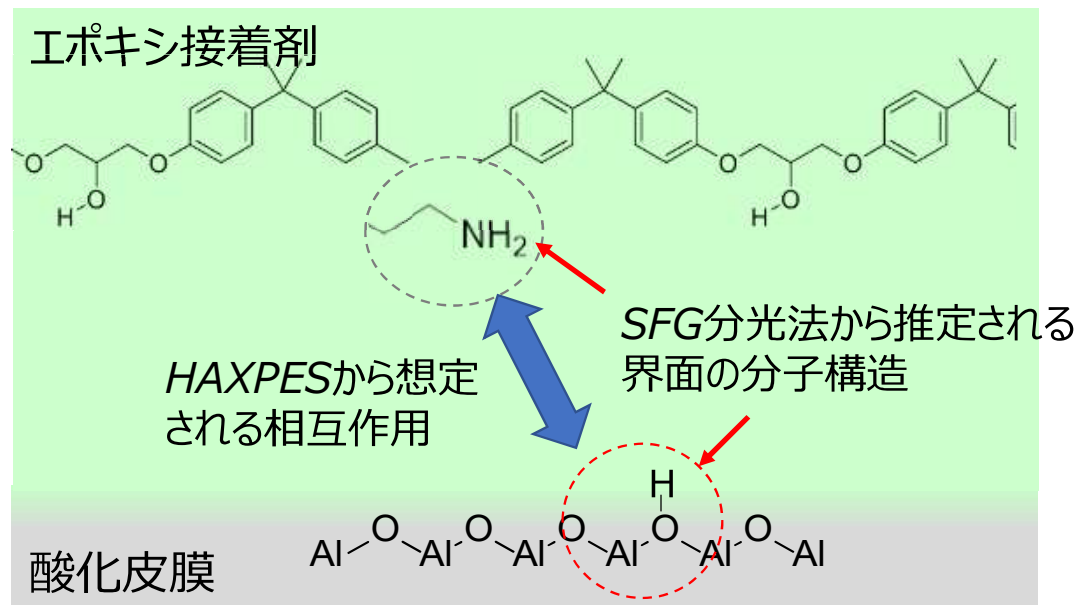
接着剤との相互作用による化学シフト

酸化皮膜表面のOH基もしくはNH基

※高橋ら, 表面技術, 2021, 72, 238.

エポキシ接着剤と金属界面の推定構造と相互作用

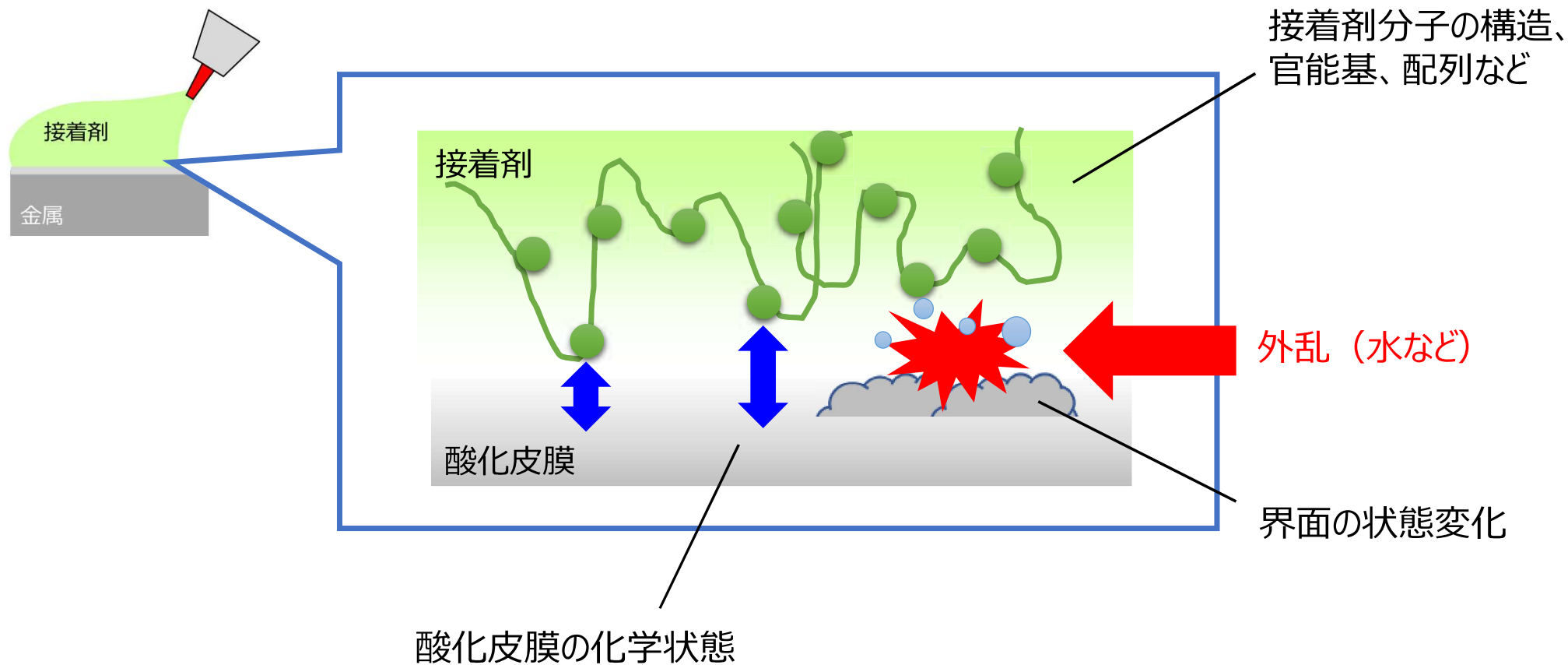
アルミニウムとエポキシ接着剤の界面では、接着剤から酸化皮膜への電子供与、すなわち酸塩基相互作用が生じていると考えられる



※高橋ら, 表面技術, **2021**, 72, 238.

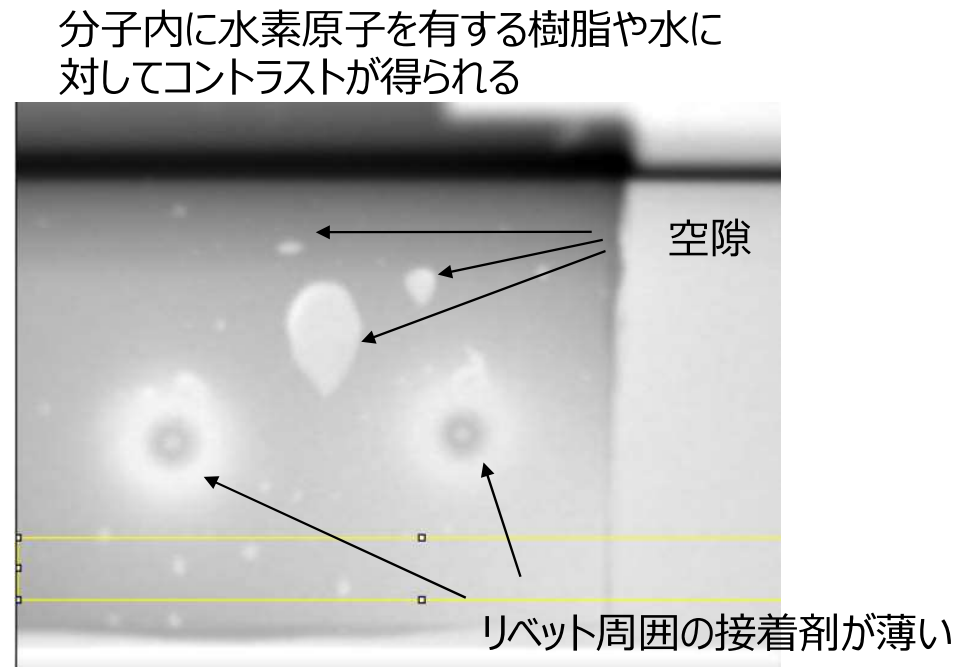
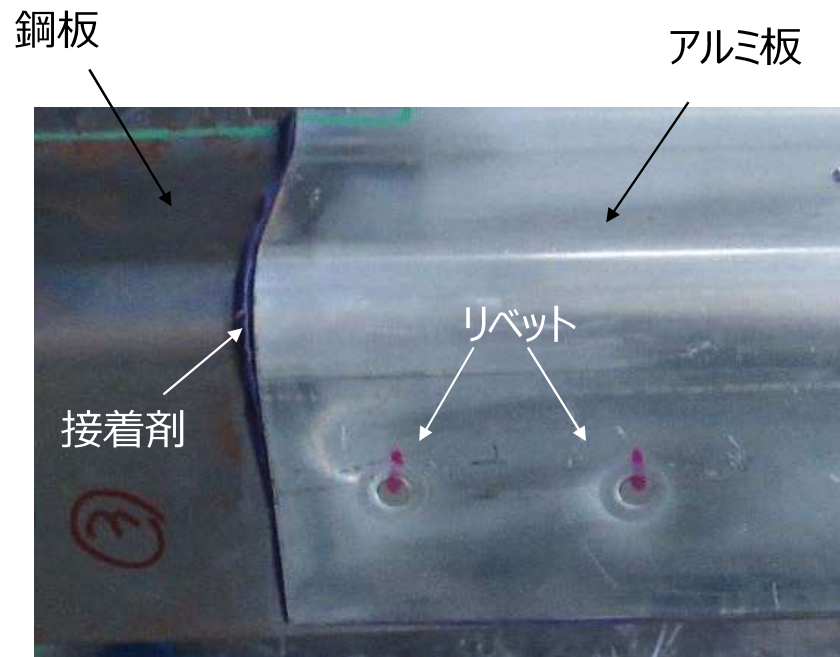
接着界面の状態を考える

外乱に伴う接着界面の状態変化を考える必要がある



中性子イメージングによる接着接合部の解析

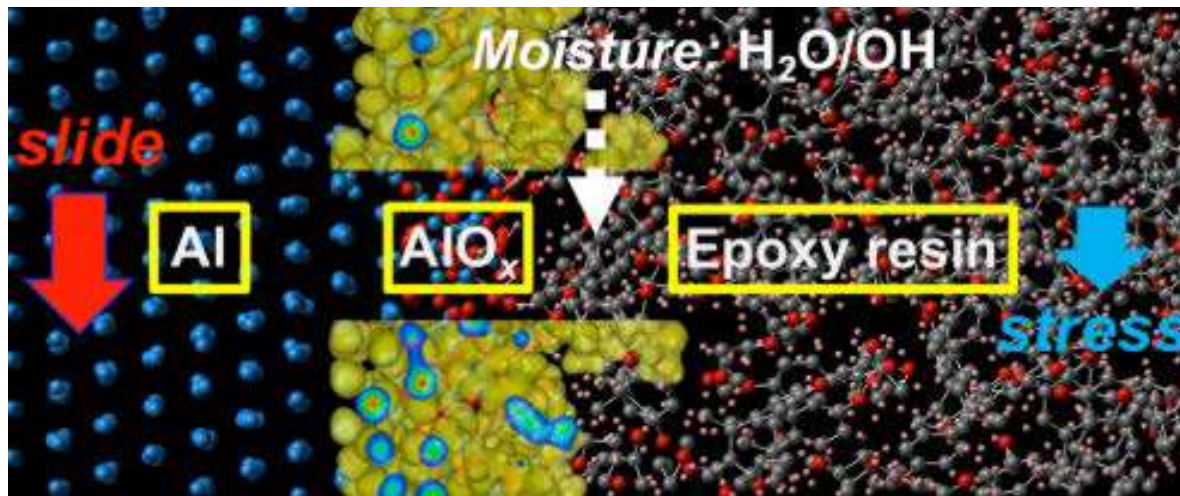
接合部における接着剤や水の検出・接合強度との関係解明に活用が期待される



※独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「革新的新構造材料等研究開発」の一環である「中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発」の成果です

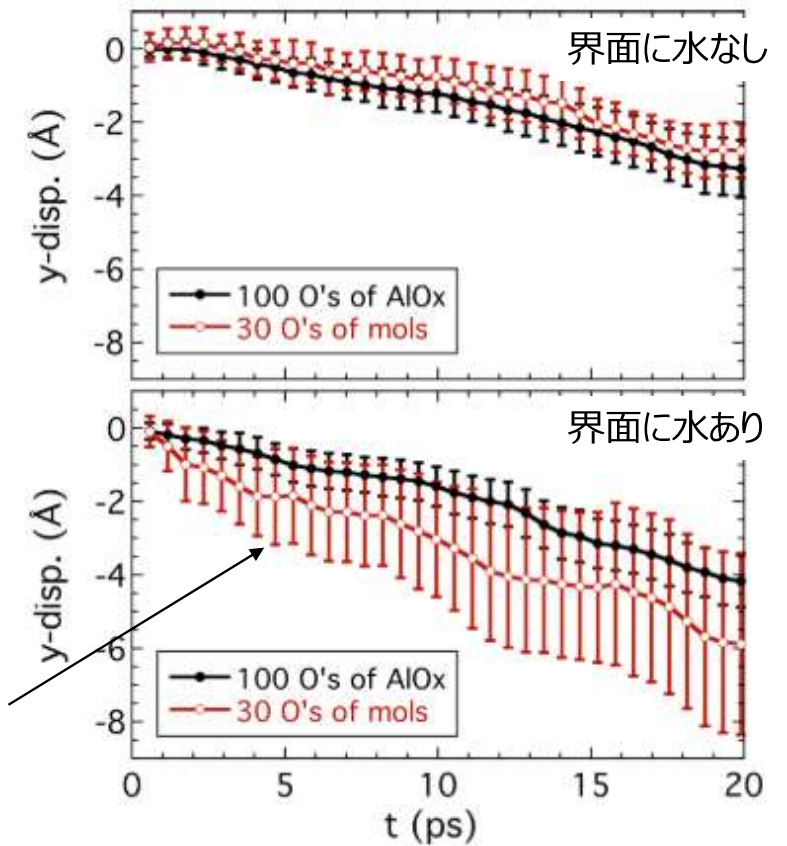
計算シミュレーションによる強度低下メカニズム解析

接着界面における水の挙動と強度低下の相関説明が期待される



※S. Ogata, et al. *J. Phys. Chem. C*, **2016**, 120, 13630.

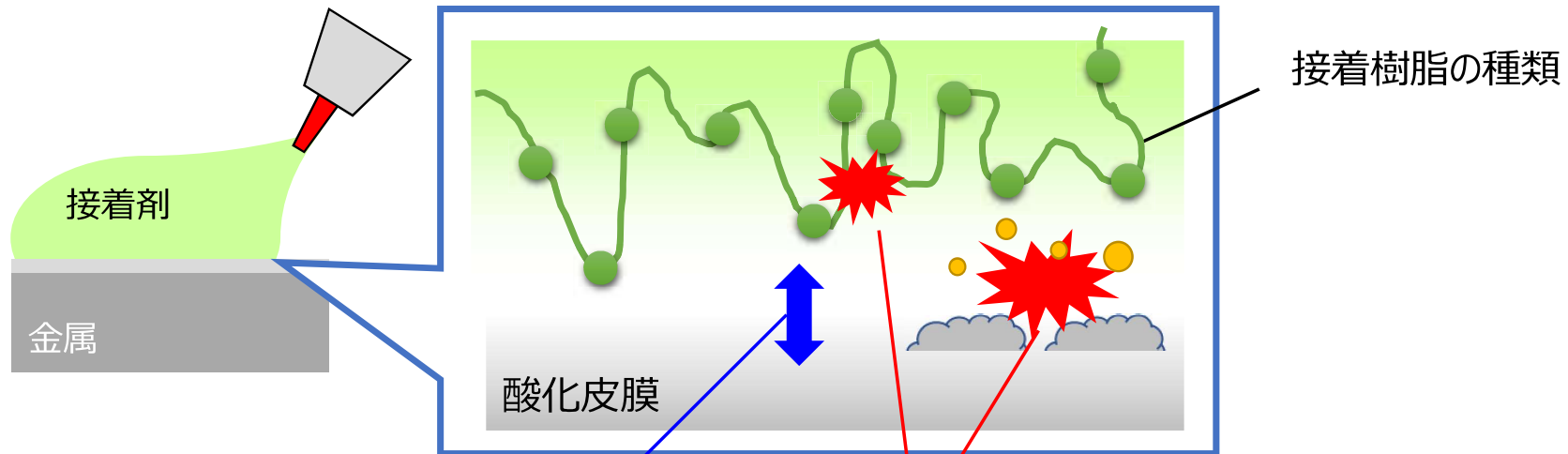
界面に水が存在すると、酸化皮膜と樹脂との相互作用が低下し、応力下での変形が大きくなっている



1. はじめに
2. 金属素材の接着接合における影響因子
3. 強度低下と表面処理
4. 接着のメカニズム
5. おわりに

金属の接着に関するまとめ

金属の接着性は界面における正の要因と負の要因の合計で決定される



負の要因 (現実)

- ✓ 汚染物・欠陥
- ✓ 表面脆弱部
- ✓ 残留応力

※高橋ら, 日本接着学会誌, 2021, 57, 201.

正の要因 (理想)

- ✓ 化学的相互作用・親和性
- ✓ アンカー効果

実際の接着力

ご紹介

◆ 本ご紹介の内容

- ✓ 高橋ら, 日本接着学会誌, 2021, 57, 201.
- ✓ 高橋, 表面分析研究会誌, 2022, 28, 102.

◆ 弊社技術ショールーム



<https://www.kobelco.co.jp/kocolab/>



https://www.kobelco.co.jp/products/r-d/achieve/1197492_14765.html

ご質問・ご相談等お気軽にお声がけください

本講演で示した研究成果はそれぞれ以下の研究課題やプロジェクト、共同研究の支援を受けたものです。研究にあたりまして多くの方々にご支援いただきましたことを、ここに感謝申し上げます。

◆ HAXPES

高輝度光科学研究センター（JASRI） 課題番号：2018A5020, 2018B5020
（株式会社コベルコ科研）

◆ 中性子イメージング

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO） 委託事業「革新的新構造材料等研究開発」-中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発
（国立研究開発法人理化学研究所）

◆ SFG分光

産業技術総合研究所 接着・界面現象研究ラボ（現千葉大学工学院） 宮前教授

◆ 計算シミュレーション

名古屋工業大学工学研究科 尾形教授

ご清聴ありがとうございました