

異種材料接合技術の現状と課題

大阪大学 名誉教授

大阪大学 接合科学研究所 招聘教授

中田 一博

軽量化技術等に係る人材育成セミナー
公益財団法人 三重県産業支援センター

2021年9月28日

講演内容

1. 異種材料接合とマルチマテリアル化
2. 異種材料接合技術への期待と現状
3. 金属材料における異種材料接合の可能性評価
4. アルミニウム／鉄の異種材料接合の現状
 - 4.1 高温反応プロセス(拡散接合、熔融溶接、ブレーズ溶接)
 - 4.2 低温反応プロセス(摩擦攪拌接合FSW等)
5. 金属／樹脂・CFRP異種材料接合
 - 5.1 金属／熱可塑性樹脂の直接接合と接合機構
 - 5.2 金属／熱可塑性CFRPの直接接合と接合機構
 - 5.3 接合継手強度に及ぼす主要因子
 - ・樹脂の官能基
 - ・金属の表面処理(粗面化、化学反応層付加)
 - ・アンカー効果
6. 今後の課題

現状と課題の俯瞰

1. 異種材料接合とマルチマテリアル化

マルチマテリアル化の目的:

異なる機能を有する材料を適材適所で使用し、部材の高機能化、多機能化、ハイブリッド機能化による高付加価値化と低級材料の代替によるコスト削減を図る

材料: 構造用材料

金属、高分子(樹脂)、セラミックス(ガラス)、
(複合材料)



異種材料接合技術

自動車の軽量化：燃費と排ガス対策

上部構造：車体（ボディー）：

- ① 高強度鋼による薄肉化：ハイテン鋼薄板
- ② 軽量非鉄金属：アルミ合金、（マグネ合金）
- ③ 樹脂材料：CFRP（BMWのi3、i8等）

強度、加工性、軽量性、（コスト）を考慮した
マルチマテリアル化 → BMWの7シリーズ

異種材料接合の組合せ：

- ① 鉄鋼／アルミ合金
- ② アルミ合金／樹脂・CFRP

平成23年度NEDO調査（2012. 3）
「省エネルギー社会構築に向けた
異種材料接合技術開発動向調査」
アンケート結果



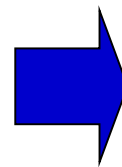
ベンツS-Class車体: Euro Car Body 2013

2. 異種材料接合技術の現状

異種材料接合の組み合わせ:

- **第1世代**: 同種金属基(合金): **既に実用化**

鉄鋼材料同士等



未解決課題の解決
とさらなる適用拡大

- **第2世代**: 異種金属(合金): **困難**(実用化は極一部)

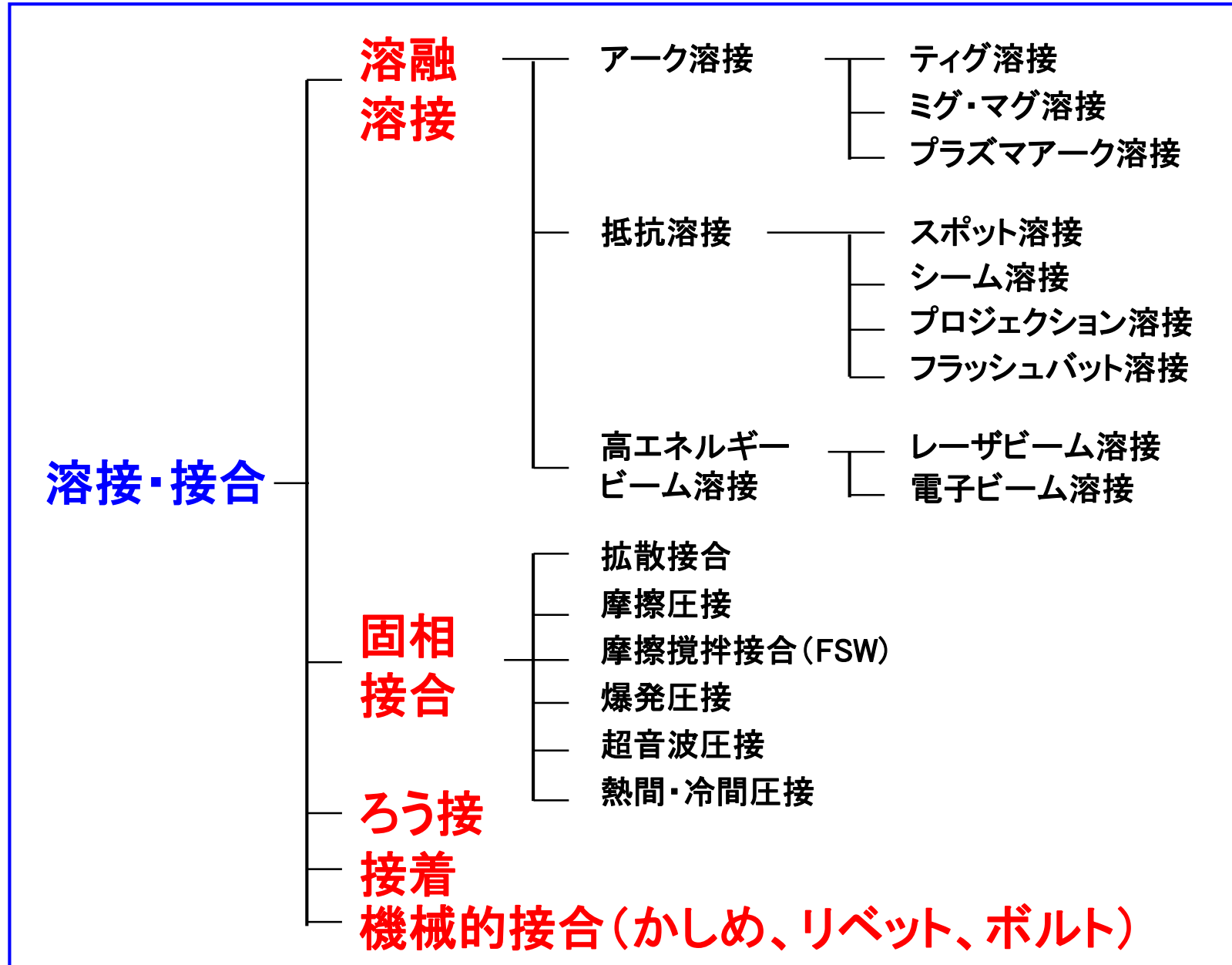
鉄鋼／非鉄(Al, Mg, Ti等)、非鉄／非鉄

- **第3世代**: 異種材料: **困難**(実用化は極一部)

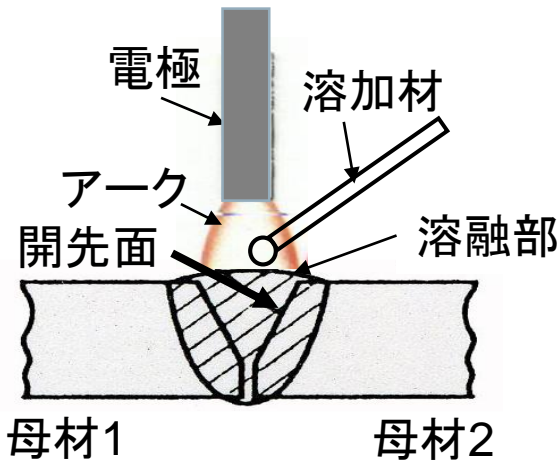
金属／樹脂／セラミックス

斬新なアイデア、先進的・革新的な研究開発

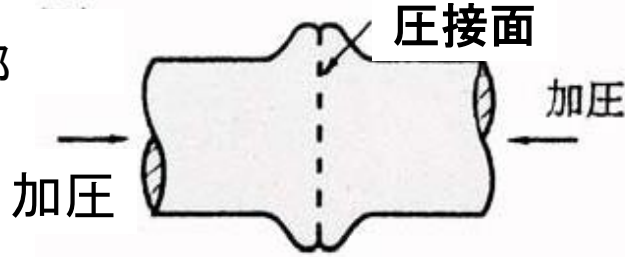
溶接・接合法の分類と種類



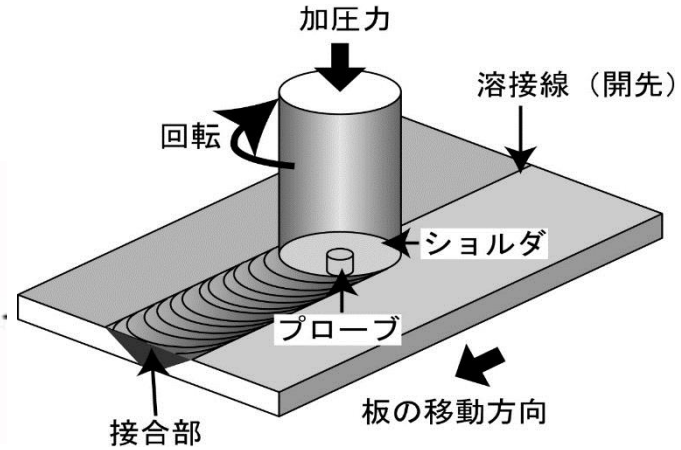
各種溶接・接合法の模式図



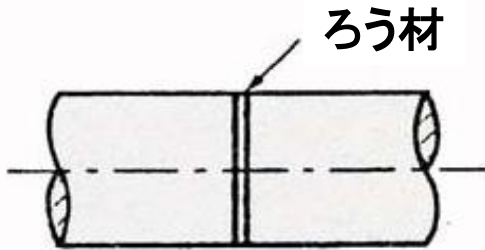
(a) 溶融溶接法
(アーク溶接の例)



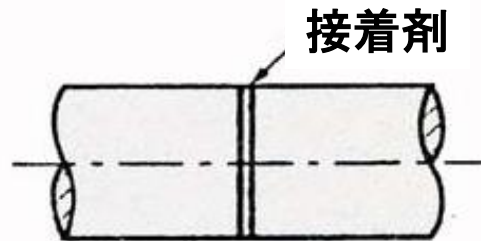
(b) 固相接合法
(摩擦圧接法の例)



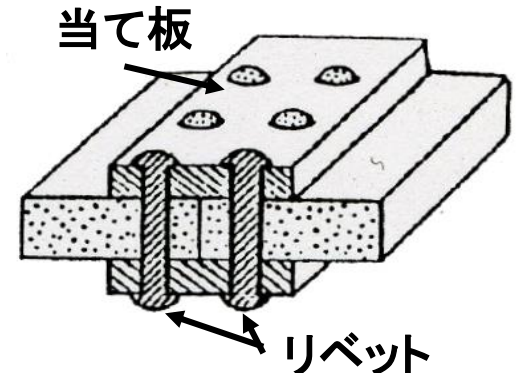
(c) 固相接合法
(摩擦攪拌接合法の例)



(d) ろう接法



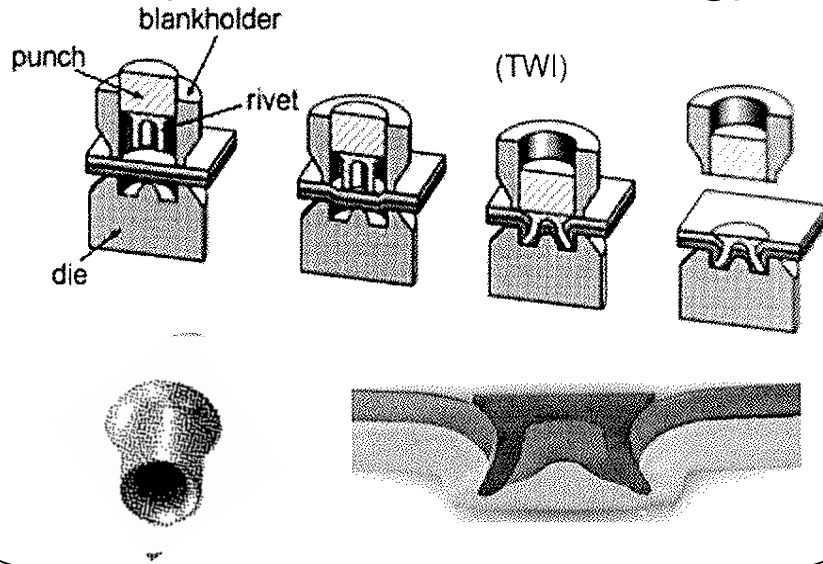
(e) 接着剤



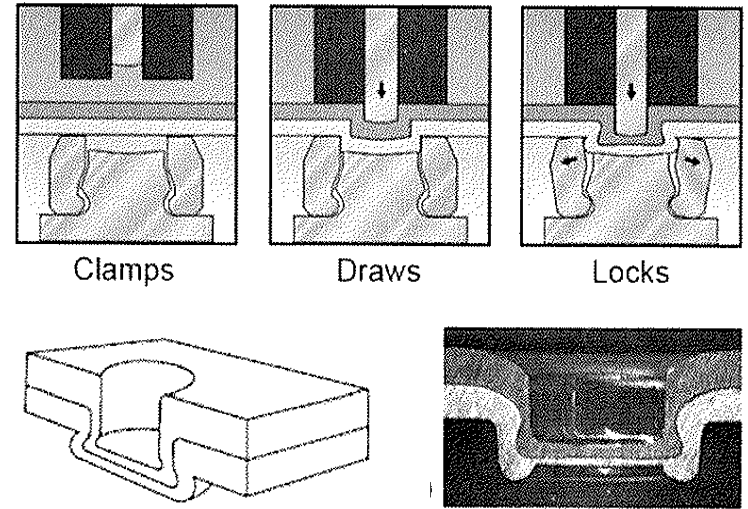
(f) 機械的接合法

自動車車体組立に適用されている機械的接合法の例

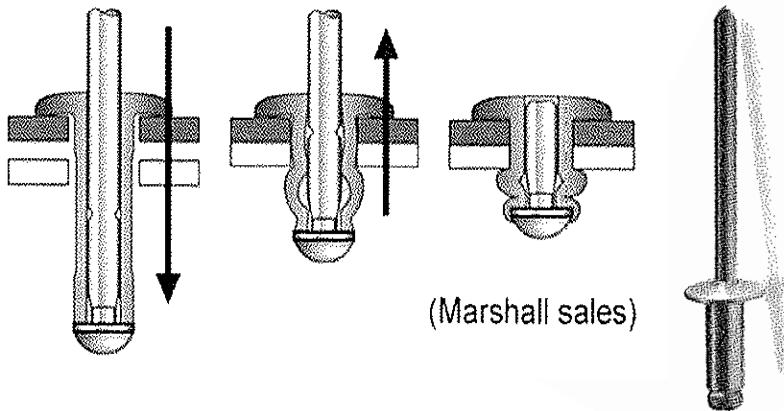
SPR(Self Pierce Riveting)



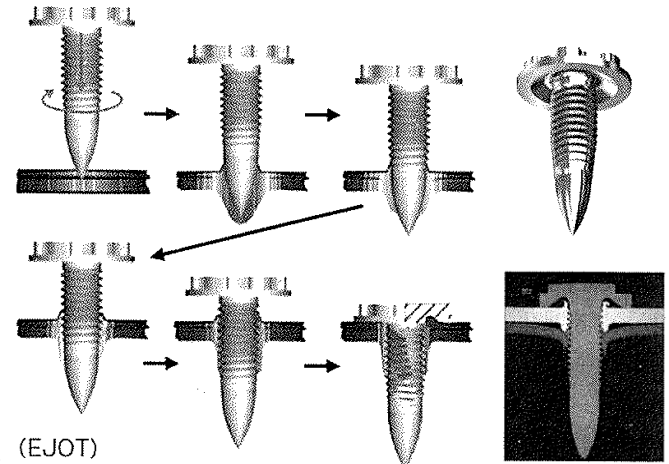
Mechanical Clinching



Blind Rivet



FDS(Flow Drill Screw)

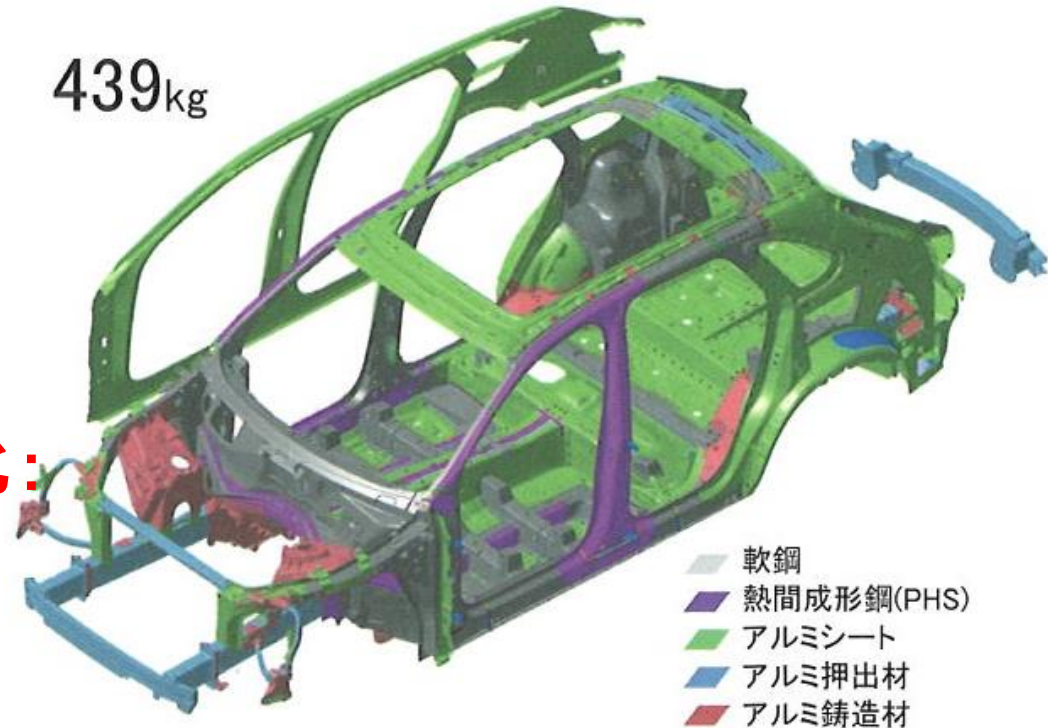


マルチマテリアル化にはマルチ接合プロセスが必須

マルチマテリアル化: Bently Bentayga (SUV, 2015.9)の例 ホワイトボディのアルミ/スチール使用比率: 50.8% / 49.2%

- ・アルミシート: 32.6%
- ・アルミ高圧鋳造材: 12.5%
- ・アルミ押出材: 5.7%
- ・先進高張力鋼 (AHSS): 18.4%
- ・高張力鋼: 14.7%
- ・熱間成形鋼 (PHS): 8.3%
- ・軟鋼 (LSS): 7.8%

439kg



接合プロセスのマルチ化:

- ・抵抗スポット溶接: スチール
- ・レーザ溶接: アルミ
- ・ミグ溶接: アルミ
- ・マグ溶接: スチール
- ・スタッド溶接: アルミ、スチール
- ・摩擦攪拌接合FSW: アルミ/スチール異材継手
- ・機械的締結: ドリルスクリュー、中空リベット、ヘミング、
- ・接着:

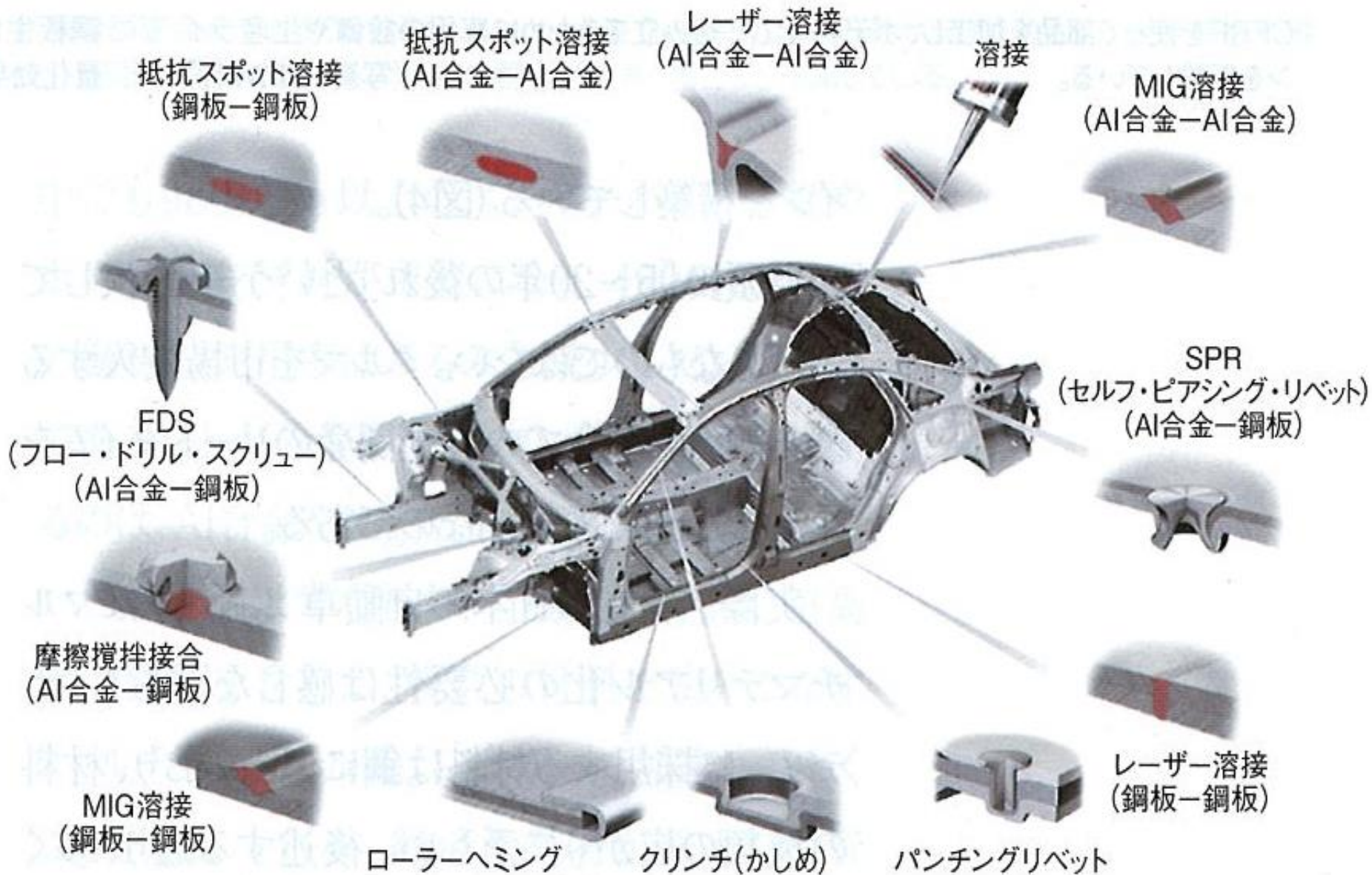
Bently Bentayga:
EuroCarBody 2016
FOURIN誌、No.35
2017.2参照

Audi社-A8のマルチマテリアルボディー構造



	Al合金板		ホットスタンプ材		Mg合金
	Al合金押し出し材		普通鋼板		
	Al合金鋳造品		CFRP		

Audi-A8のマルチボディー化に使用された各種接合法



接合プロセスの異種材料接合への適用性

接合プロセス			異種材料の組み合わせ			
			同種 金属基	異種 金属基	金属／樹脂 金属／CFRP	金属／ セラミックス
直接 接合	溶融溶接	アーク溶接	◎	△	×	×
		抵抗スポット溶接	◎	△	△*	×
		レーザ溶接	◎	○	◎*	×
	ろう接	ろう付	◎	◎	×	◎
	固相接合	拡散接合	◎	○	×	×
		圧接	◎	○	△	×
FSW		◎	◎	◎*	×	
間接 接合	接着	接着剤	◎	◎	◎	◎
	機械的 締結	リベット、ボルト、 かしめ	◎	◎	◎	△

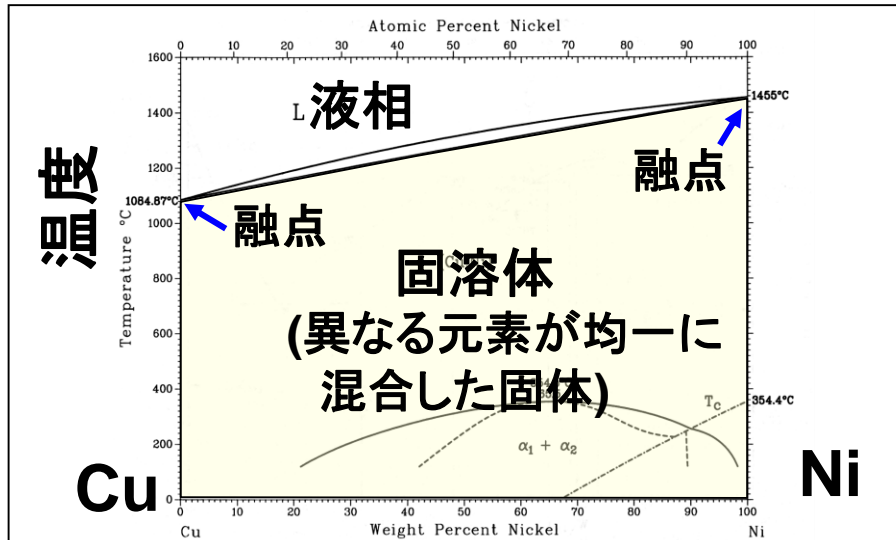
異材接合の可能性: ◎高い、○材料に大きく依存、△低い、×不可、*特別な手法

(中田作成)

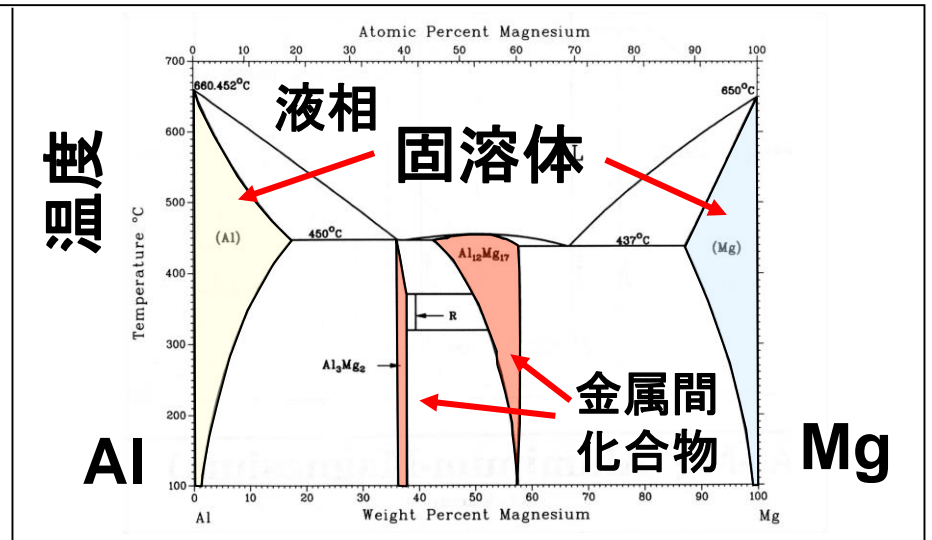
3. 金属材料における異種材料接合 の可能性

平衡状態図から分かる金属材料の異種材料接合の可能性

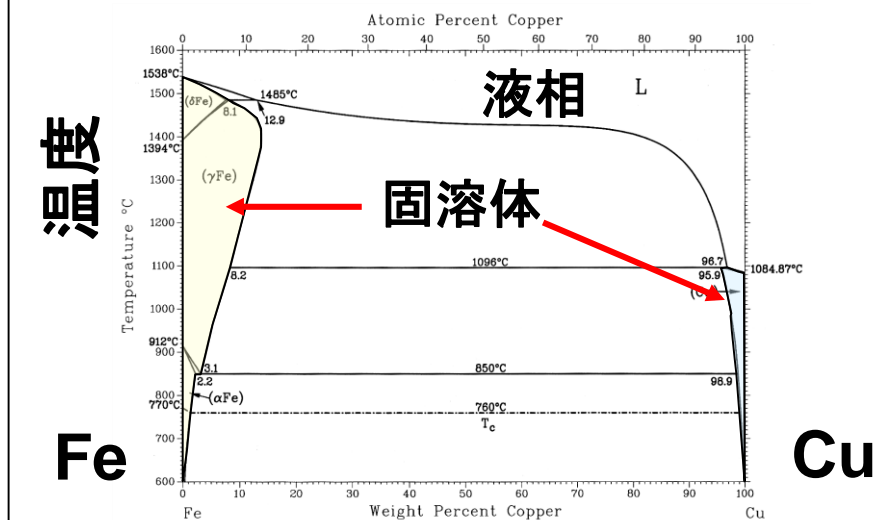
接合界面組織が固溶体か、金属間化合物かで接合性が決まる



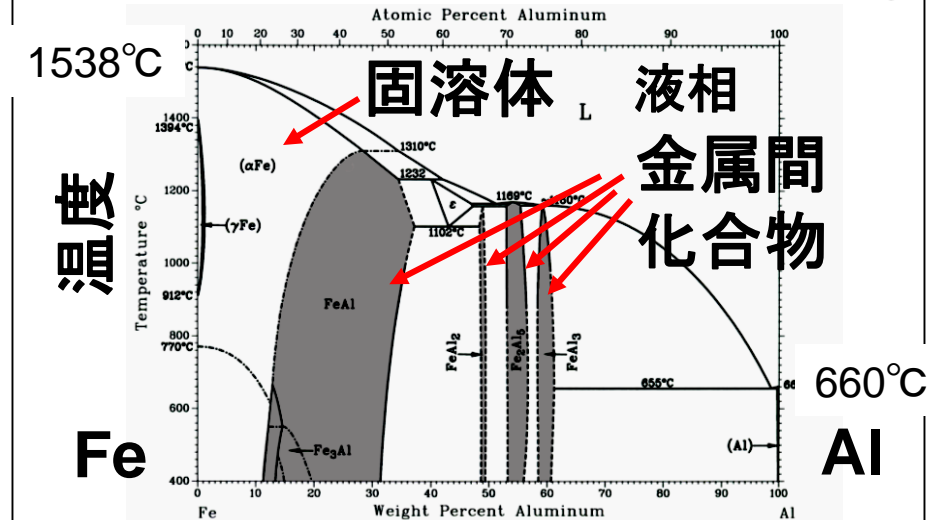
(a) 全率固溶体 Cu-Ni



(c) 一部固溶体 + 金属間化合物 Al-Mg



(b) 2相分離 Fe-Cu



(d) 一部固溶体 + 金属間化合物 Fe-Al

状態図と関連づけた異材接合の可能性(レーザ溶接、AWS)

	Ag	Al	Au	Be	Co	Cu	Fe	Mg	Mo	Nb	Ni	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	W
Al	2																
Au	1	5															
Be	5	2	5														
Co	3	5	2	5													
Cu	2	2	1	5	2												
Fe	3	5	2	5	2	2											
Mg	5	2	5	5	5	5	3										
Mo	3	5	2	5	5	3	2	3									
Nb	4	5	4	5	5	2	5	4	1								
Ni	2	5	1	5	1	1	2	5	5	5							
Pt	2	5	1	5	1	1	1	5	2	5	1						
Re	3	4	4	5	1	3	5	4	5	5	3	2					
Sn	2	2	5	3	5	2	5	5	3	5	5	5	3				
Ta	5	5	4	5	5	3	5	4	1	1	5	5	5	5			
Ti	2	5	5	5	5	5	5	3	1	1	5	5	5	5	1		
W	3	5	4	5	5	3	5	3	1	1	5	1	5	3	1	2	
Zr	5	5	5	5	5	5	5	3	5	1	5	5	5	5	2	1	5

平衡状態図的にはAl/FeやTi/Feの溶接は不可能

1:溶接可能(固溶体形成) 2:ほぼ溶接可能(複雑な組織形成) 3:溶接には注意が必要(溶接に関するデータが不十分) 4:溶接には極めて注意が必要(信頼できるデータ無し), 5:溶接不可能(金属間化合物形成) *)Welding handbook, Vol.2, 8th edition, America Welding Society, Miami, FL, 1991

第1世代：同種金属基（合金）

- ・同じ種類の金属とその合金のグループ
同士の異種材料接合
- ・主に鉄鋼材料において、古くから実用化
- ・溶融溶接施工法等がほぼ確立、整備

- ・炭素鋼／合金鋼／ステンレス鋼など
- ・アルミニウム合金同士（異なる合金系）
- ・溶接材料・溶接法・溶接条件の最適化

同種金属基でも成形加工プロセスの異なる部材の接合性

部材	溶融溶接性	固相接合(FSW)性
圧延材	◎	◎
押出材	◎	◎
鍛造材	◎	◎
鑄造材	○	◎
高圧鑄造 (ダイカスト)材	△	◎
粉末焼結材	×	◎
複合材	×	○
発泡・ポーラス材	×	△
強塑性加工材	×	○

◎容易、○要注意、△困難、×不可

(中田作成)

異材接合：材料素材の組み合わせ＋成形加工の組み合わせ
両方を考慮する必要がある

成形法の異なる合金の組合せ (Al合金の例) (固相接合であるFSWによる異材接合例)

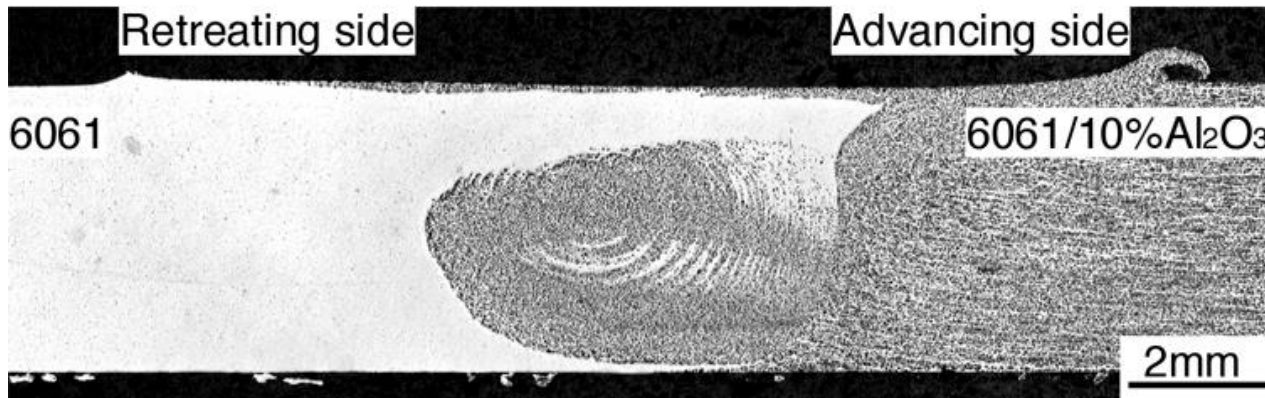
圧延材 / ダイカスト材 / 鋳造材 / 粉末成形材 / 複合材

後退側

前進側



ダイカスト材と圧延材との接合



10%Al₂O₃ 6061MMCと6061アルミ合金とのFSW突合継手

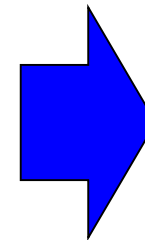
ダイカスト材、
鋳造材、粉末
成形材および
複合材は、気
孔等の発生
により熔融溶
接は不可能

(中田作成)

第2世代：異種金属基（合金）

- 異なる種類の金属とその合金間の異種材料接合
- 金属の種類のコボ合せにより実用化の程度は大きく異なる
- 最もニーズの大きい組合せ：
鉄鋼／アルミニウム合金

残念ながら状態図上では
直接接合は極めて困難



古くから開発
研究が継続

実用的には間接的接合法が適用：リベット＋接着

4. アルミニウム／鉄の異種材料接合 の現状

a

鋼板／Al合金の異材接合：機械的締結と接着剤：間接的接合法



- b
- 高張力鋼板 (熱間成形)
 - 高張力鋼板
 - 鋼板
 - アルミ合金

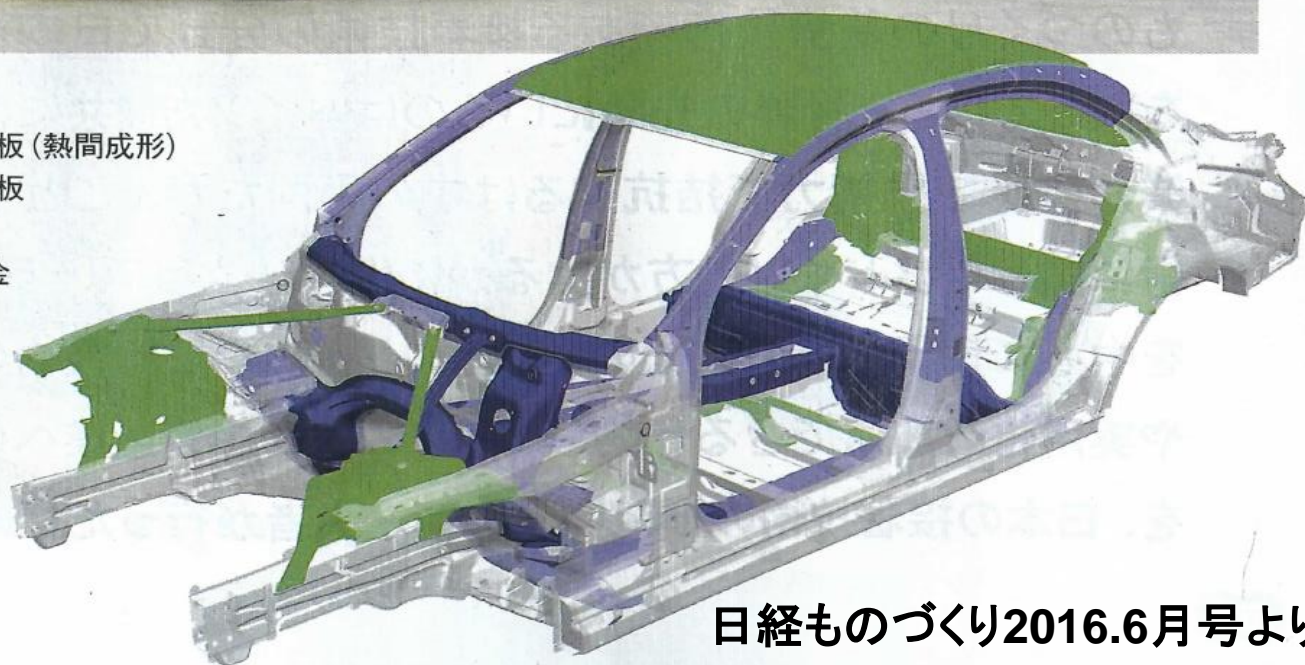


図1 Daimler社の「メルセデス・ベンツCクラス」

(a) 外観。(b) ボディーの構造。アルミ合金と鋼という異種材料を機械的締結と接着剤を使って接合している。

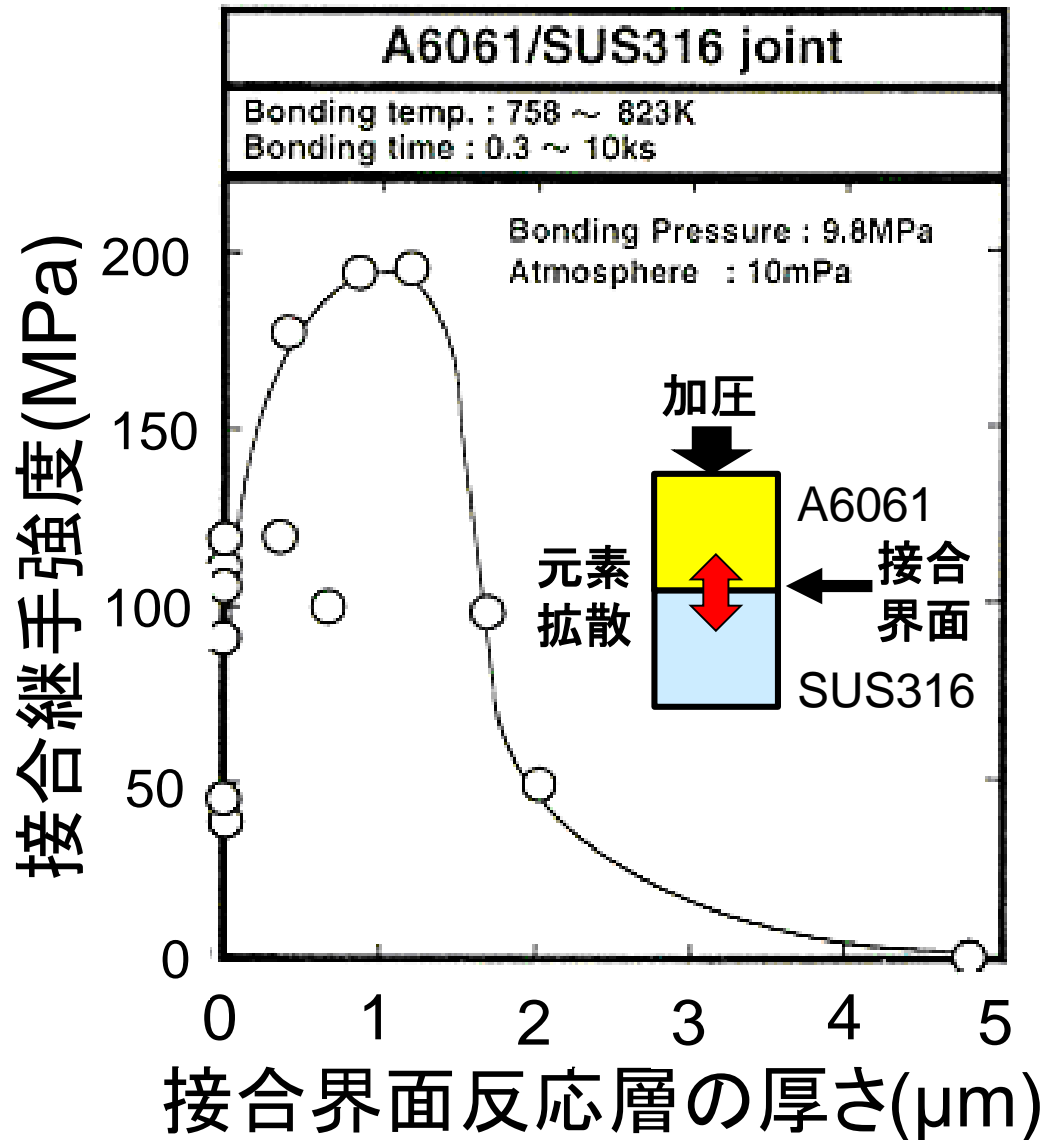
アルミ合金と鉄鋼の直接異材接合が可能な 接合界面構造（過去の文献等からの取り纏め結果）

接合プロセス		接合界面構造
高温反応	溶融溶接 抵抗溶接 ろう付 拡散接合	<ul style="list-style-type: none"> ・高温反応のため金属間化合物層形成 ・金属間化合物層の厚さが支配因子 ・数 μm ($1\mu\text{m}$) 以下で良好な継手強度
低温反応 塑性流動現象	圧接 摩擦圧接 超音波 爆接 FSW	<ul style="list-style-type: none"> ・金属間化合物層がSEM程度では認められない ・界面にアモルファス層形成 (数nm～数十nm厚さ, 酸化物層) ・化合物との複合層

(中田作成)

アルミ／鉄の拡散接合の例（高温反応プロセス）

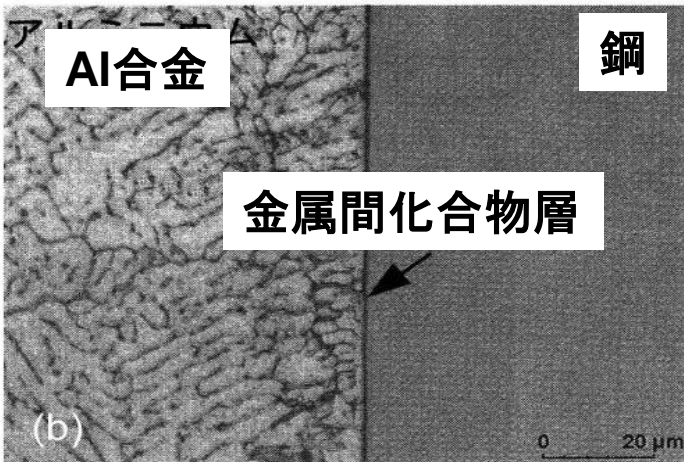
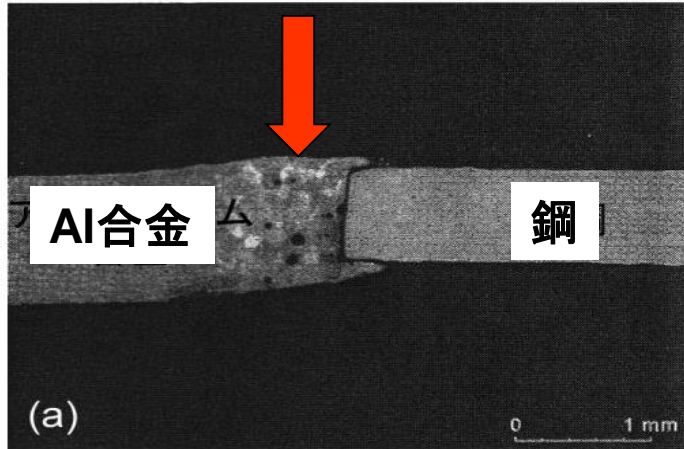
固相接合であるが、融点直下の高温の、真空中で長時間加熱



- ・金属間化合物層形成
- ・金属間化合物層厚さが継手強度の支配因子
- ・金属間化合物層厚さ1~2 μmで最高強度
- ・これより薄いと低下（接触部が不均一）
- ・これより厚いと低下（金属間化合物層内破断）

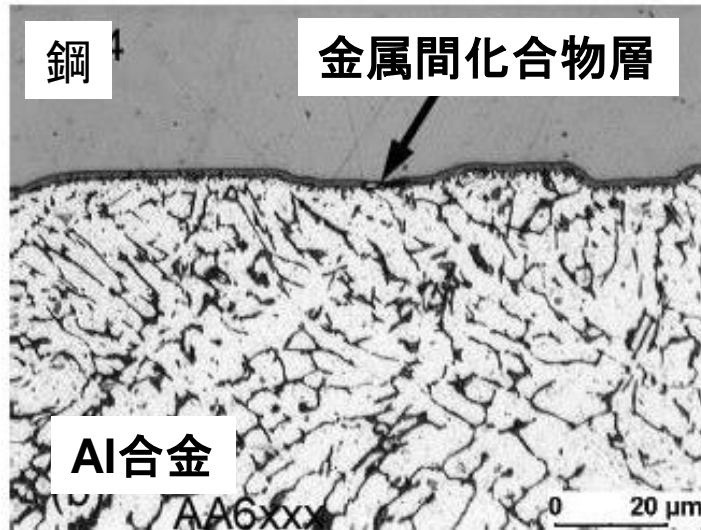
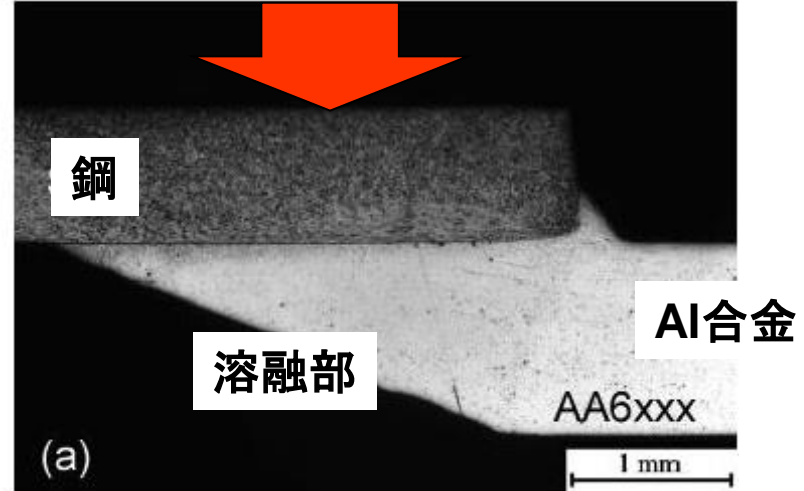
レーザー溶接(ブレージング)の例 (高温反応プロセス)

突合せ継手：レーザー照射置をAl側とし、Alのみ溶融



M.Kreimeyer:Schw. & Schen
2002,DVS220,256.

重ね継手：レーザー照射位置を鋼板裏面とし、鋼板からの間接加熱でAlのみ溶融



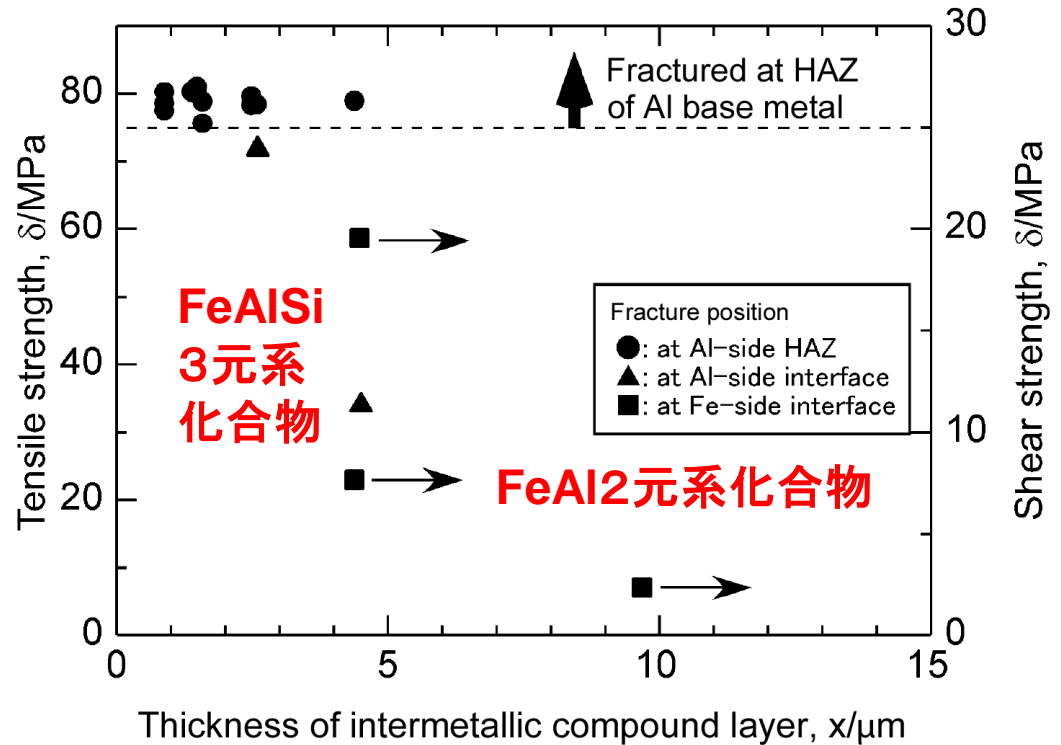
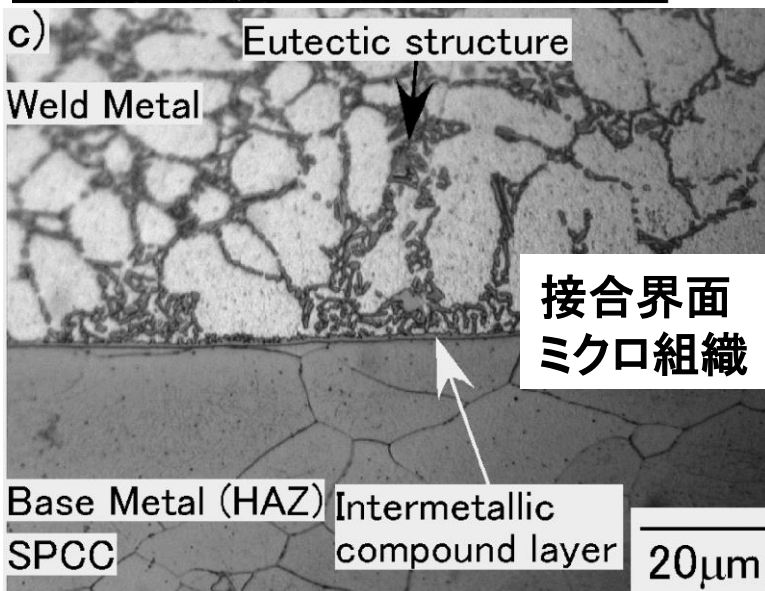
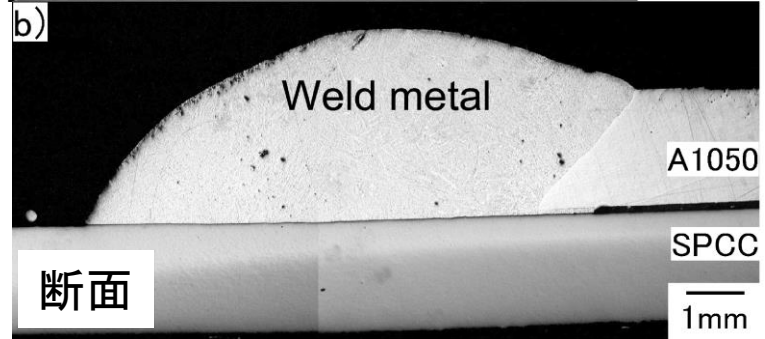
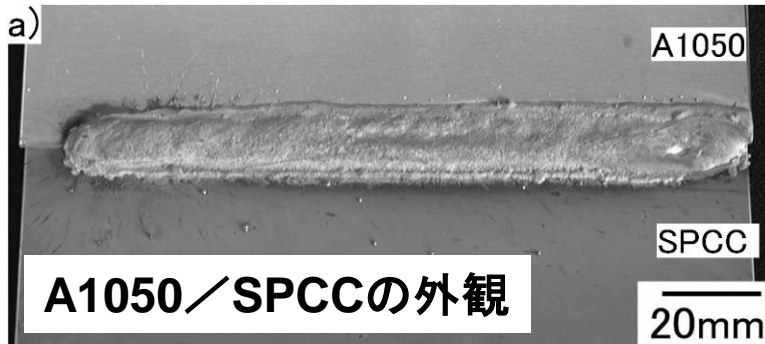
F.Wagner:
ICALEO
2001,
C,1301

Al合金/Steel異材接合継手の断面マクロおよびミクロ組織

ミグアークブレード溶接重ね継手(ろう接の一種)

母材よりも融点の低いろう材を用いて、できるだけ母材を溶融しないで溶接する

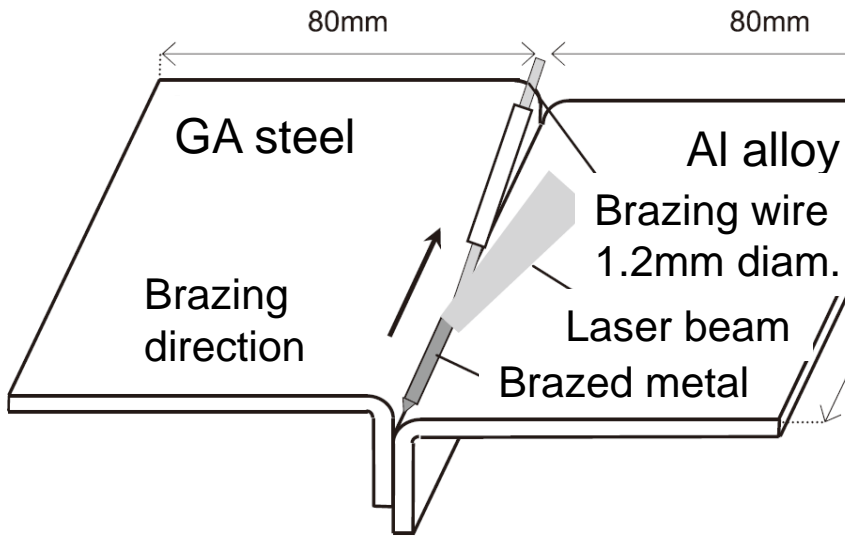
継手: アルミA1050/炭素鋼SPCC
溶加材ワイヤ (フラックス内蔵)
BA4047 (Al-12%Si合金)



1~3μm厚さでAl母材破断

T.Murakami, K.Nakata et al:ISIJ Int.43(2003)1596.

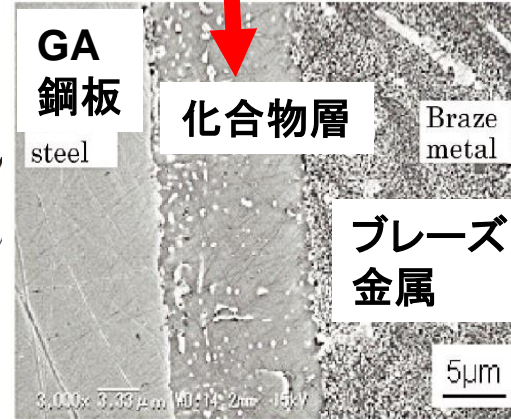
新しいZn-Si合金溶加材を用いたアルミ合金／亜鉛めっき鋼板の異材レーザーブレージング



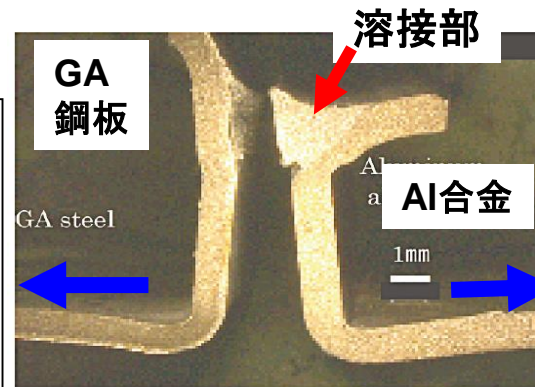
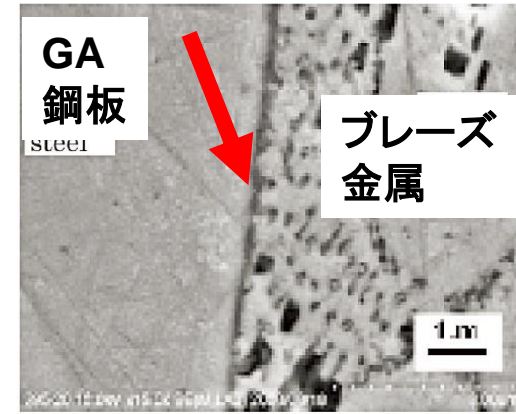
半導体レーザー、フレア継手
GA鋼板／6022Al合金

継手開先を埋める溶加材が必要
GA鋼板同士: Cu-Si合金溶加材
Al合金同士: Al-Si合金溶加材
GA鋼板／Al合金では、これまで
適当な溶加材なし

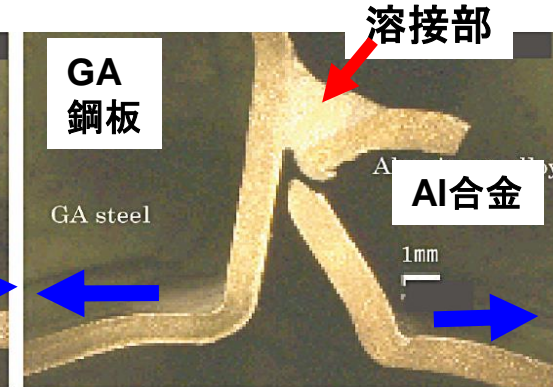
Fe-Al化合物
厚さ10 μ m



Fe₃Al₂Si₃化合物
厚さ100nm程度
 α Fe結晶整合性良好



Zn-6%Al溶加材
ろう付部界面破断



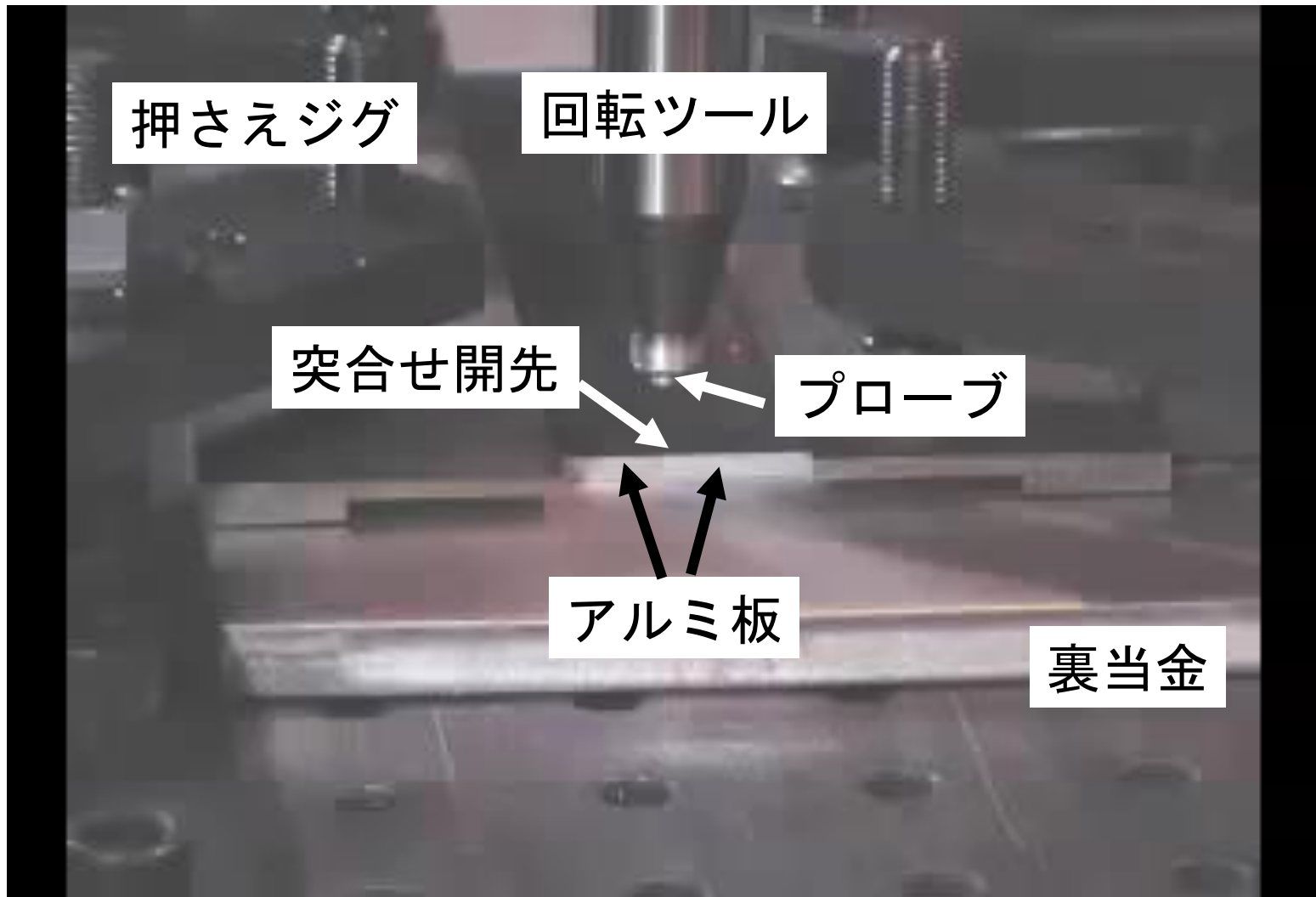
Zn-1%Si溶加材
Al合金母材HAZ破断

(ホンダエンジニアリング)

(脇坂、鈴木:溶接学会論文集、30(2012)274-279)

ピール試験後の継手断面と破断位置

金属の塑性流動利用の固相接合一摩擦攪拌接合FSW 動作ビデオ



被接合材:アルミ合金板、板厚6mm

金属の塑性流動利用の固相接合一摩擦攪拌接合FSW 動作ビデオ



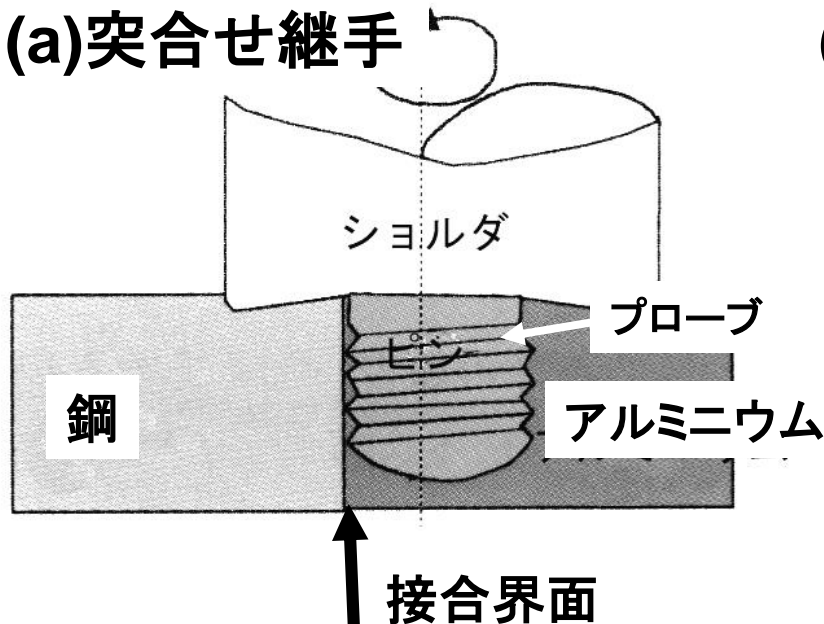
被接合材:アルミ合金板、板厚6mm

FSWによるAl合金／鉄鋼の異種材料接合の提案

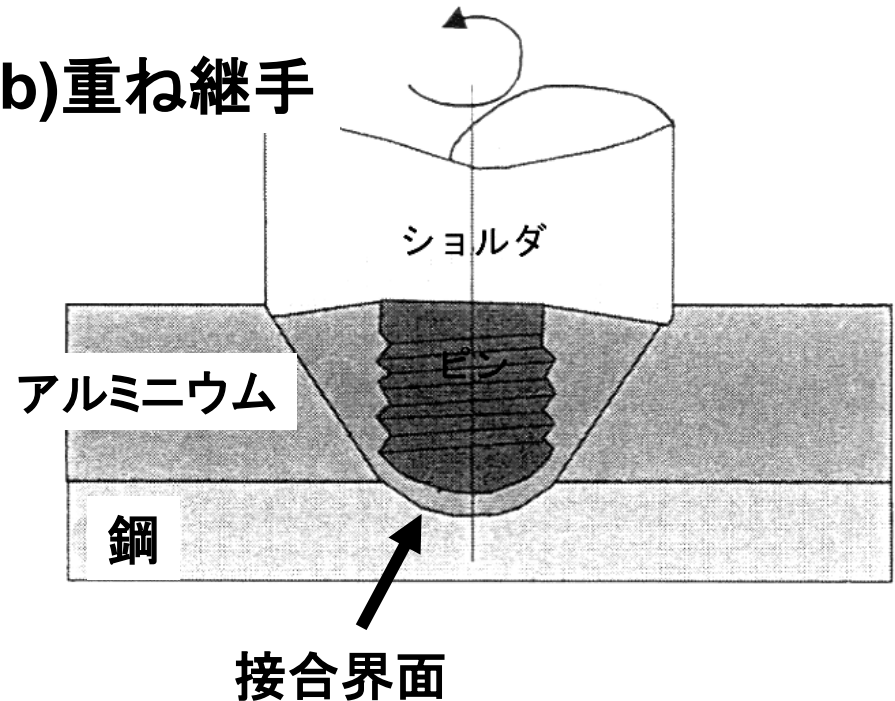
- 回転プローブによる接合界面の清浄化／活性化
- 低温・短時間接合と金属の塑性流動の活用

接合部断面とピン挿入位置

(a)突合せ継手



(b)重ね継手



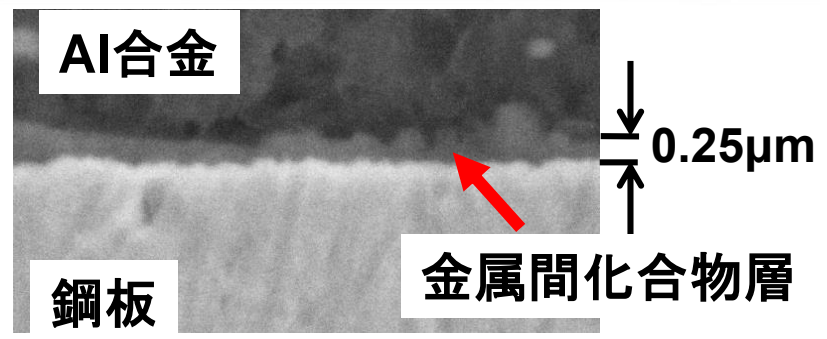
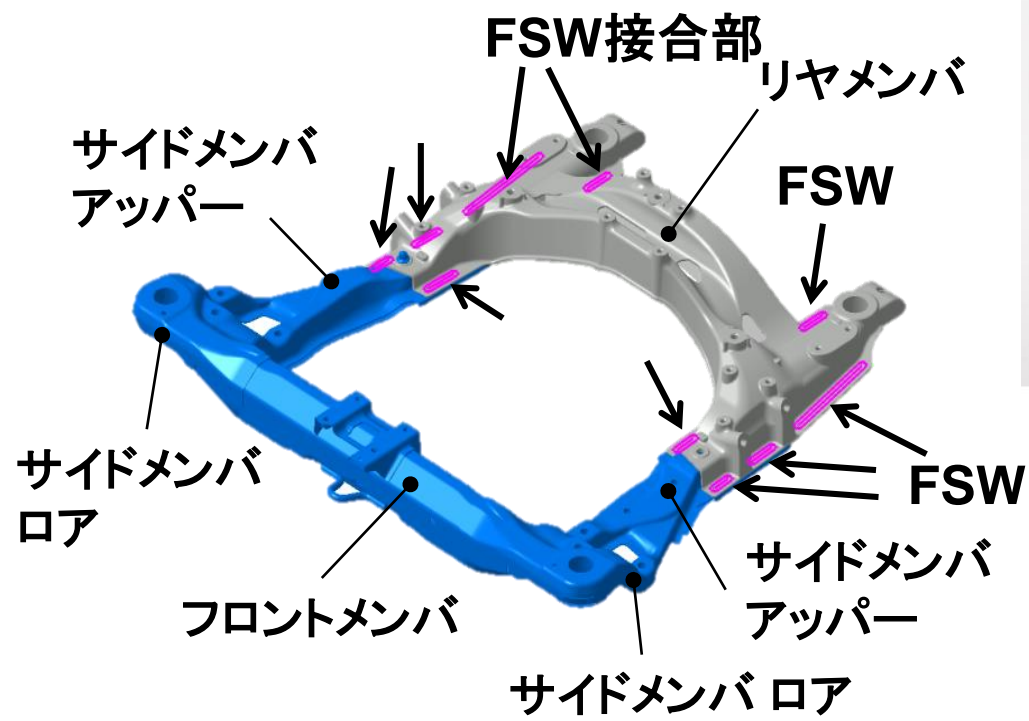
岡村ら：溶接学会誌72(2003)436.

岡村ら：軽金属溶接 42(2004)49.

鋼板とAl合金のFSWによる直接異種材料接合

サブフレーム重ね継手への実用化例:ホンダ

・日経ものづくり
2012年10月、18-19
・佐山:軽金属溶接、
52(2014)1,3-9.



サブフレーム重ね継手と接合部 ((株)本田技術研究所ご提供)

5. 金属／樹脂・CFRP異種材料接合の 現状

第3世代異種材料接合

異なる材料間の接合

- ・金属／高分子材料
- ・金属／セラミックス

a



BMW-i3 接着法

図2 BMW社の電気自動車「i3」

(a) 外観。(b) ボディーの構造。CFRP製キャビンとアルミ合金製シャーシから成る。CFRP製キャビンの接合にはほぼ接着剤だけを使った。タクトタイムは2分と短い。さらに、CFRP製キャビンとアルミ合金製シャーシの接合にも接着剤が使用されている。

上部骨格(CFRP製)

b

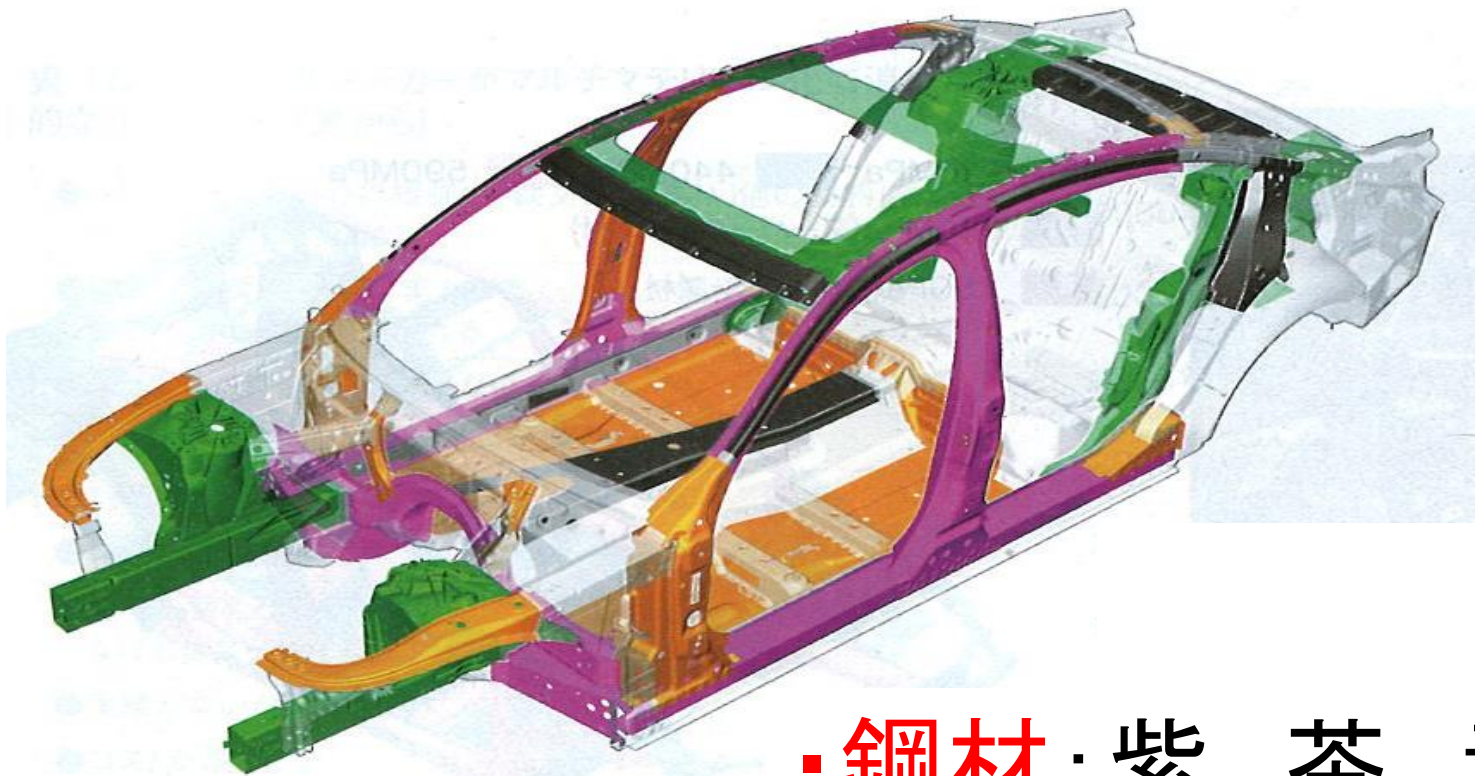


フロア骨格(アルミ合金製)

リチウムイオン2次電池

日経ものづくり2016.6月号より

BMW-7シリーズのマルチマテリアルボディ構造



- **鋼材**：紫、茶、青色
- **Al合金**：緑色
- **CFRP**：黒色

日経ものづくり：2016.6月号

日経ものづくり：今こそ本気でマルチマテリアル、Part 1総論、2017.9、38-43

実用化されている金属／樹脂異種材料接合法の特徴

接合法		接合手法	特長	欠点
間接接合法	接着法	接着剤	<ul style="list-style-type: none"> 継手形状、寸法の自由度大 熱可塑及び熱硬化性樹脂に適用可 	<ul style="list-style-type: none"> 消耗品(接着剤)必要 溶媒溶液の安全性 接着剤の固化時間
	機械的締結法	<ul style="list-style-type: none"> リベット ボルト かしめ 	<ul style="list-style-type: none"> 継手形状、寸法の自由度大 熱可塑及び熱硬化性樹脂に適用可 	<ul style="list-style-type: none"> 応力集中部の存在 気密性が不十分 リベット、ボルト等消耗品必要
直接接合法	熱圧着法	<ul style="list-style-type: none"> 高周波加熱 抵抗加熱 超音波加熱 レーザー加熱 	<ul style="list-style-type: none"> 継手形状、寸法の自由度大 熱可塑性樹脂に適用 消耗品不要 	<ul style="list-style-type: none"> 熱硬化性樹脂への適用困難
	インサート成形法	金型を用いる溶融樹脂の射出成形	<ul style="list-style-type: none"> 小物部品の大量生産可能 熱可塑及び熱硬化性樹脂に適用可 	<ul style="list-style-type: none"> 射出成形機と金型が必要 部品形状、寸法の制約が大きい

(中田作成)

金属／樹脂・CFRPの異種材料接合

- インサート成形法：小物部品等で実用化
- 板材の接合：開発途上（一部実用化）

間接接合法：(熱可塑樹脂・熱硬化樹脂)

- ・接着剤
- ・機械的締結法：リベット、ボルト、かしめ等

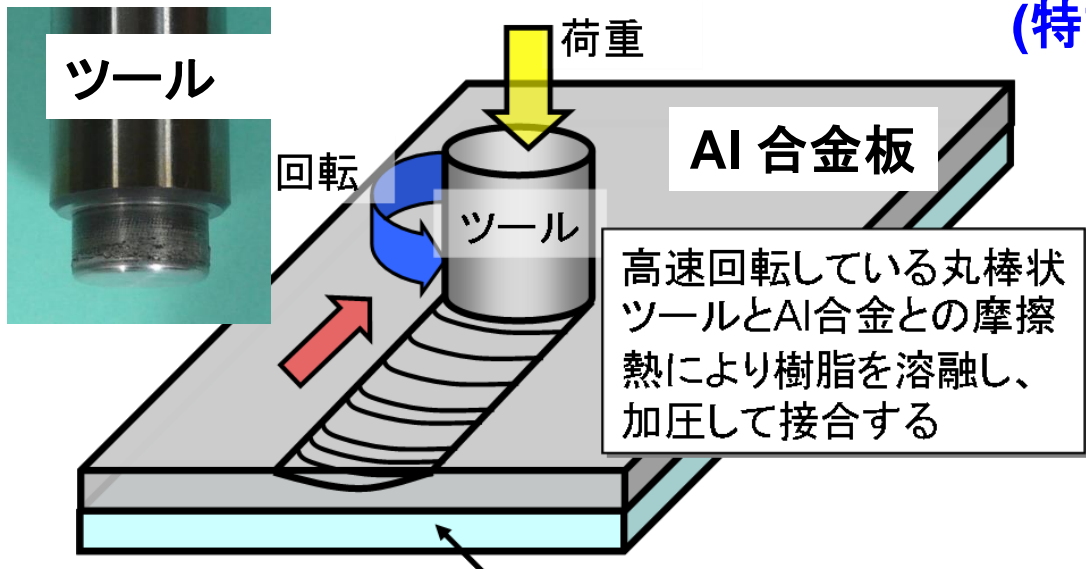
直接接合法：

- ・熱溶着法：(熱可塑性樹脂)
 - ・加熱方法：超音波、抵抗、高周波等
 - ・レーザ接合法（レーザエネルギー利用）
 - ・摩擦重ね接合法（摩擦エネルギー利用）

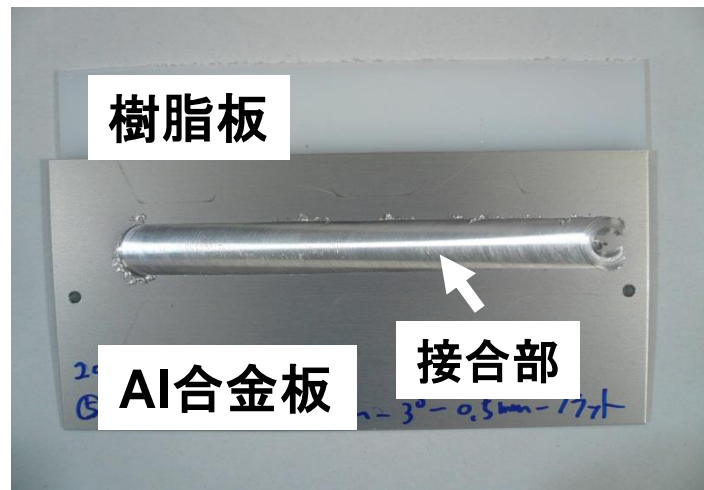
マルチマテリアル化に向けた多様な接合方法の整備が必要：継手形状、特性、量産性、コストなど

摩擦エネルギーを利用した金属と樹脂との直接接合法： 摩擦重ね接合法 (Friction Lap Joining, FLJ法)

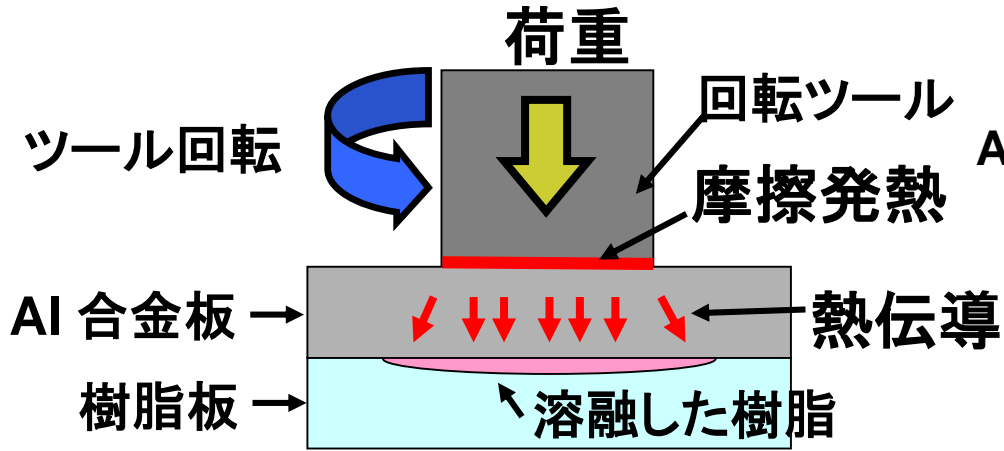
(特許第5817140号、H27.10.9登録)



FLJ接合法概略図



接合継手外観



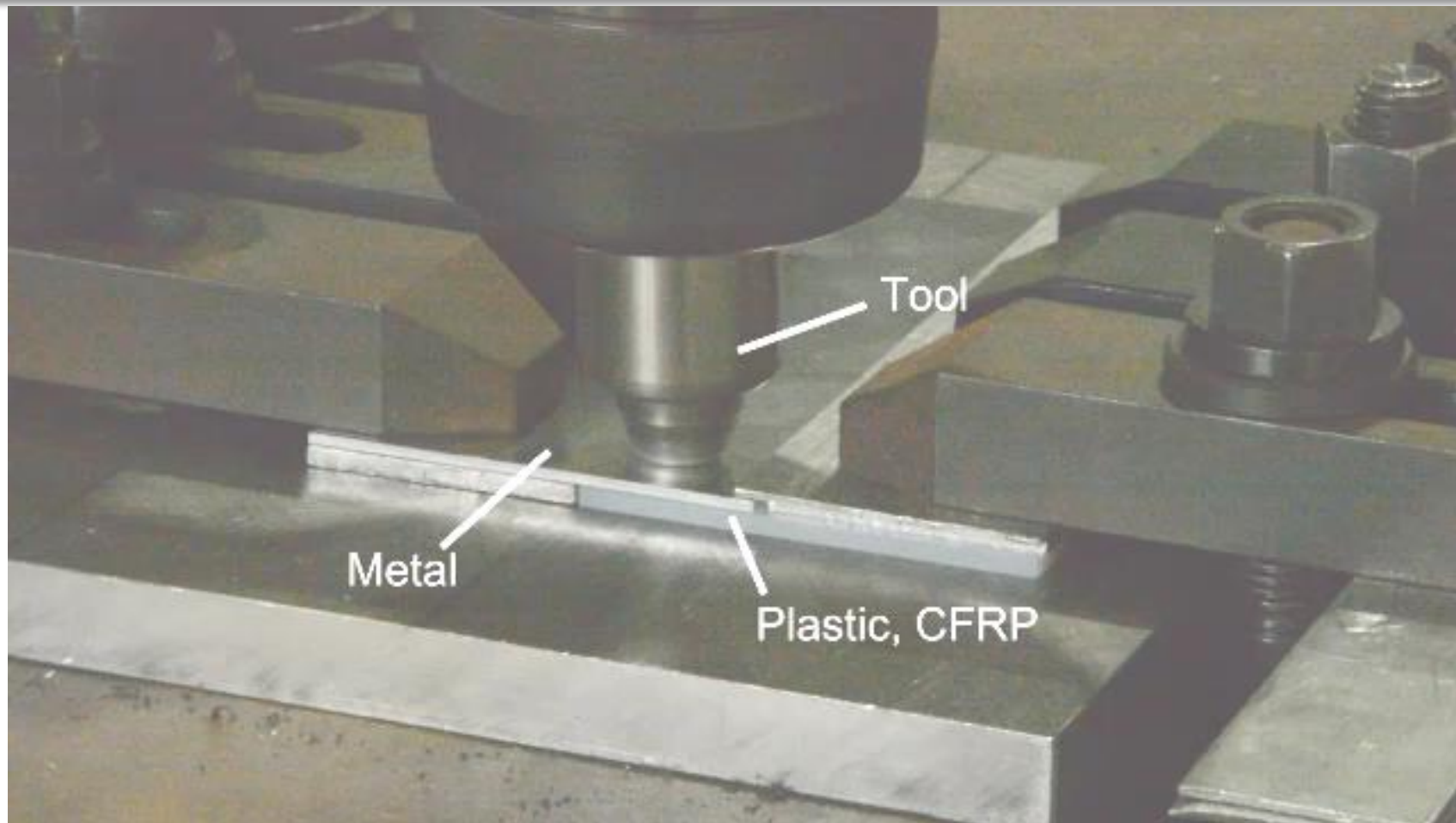
接合機構



接合継手断面

(岡田、中田ら: 軽金属溶接、53(2015)298-306)

摩擦重ね接合法 (Friction Lap Joining, FLJ法) 動画



回転ツールを金属板に押し付けて、摩擦熱によって加熱を行い、樹脂を溶融・凝固させて接合する。これを移動させることで、線状の連続的な接合が可能。

接合部の加熱と同時に加圧ができるため、高い密着性および接合性が期待される。
接合部の幅は、概ねツールの直径(Φ15mm)程度が強固に接合される。

接合性に及ぼす樹脂特性とアルミ合金の表面状態の影響

樹脂	Al表面状態	重ね接合継手断面組織
EAA	受入材のまま	
	アルマイト皮膜	
PE	受入材のまま	
	アルマイト皮膜	

熱可塑性樹脂

**EAA: エチレンアクリル酸
コポリマ**

極性官能基: COOH基を有する

アルミ合金の表面状態によらず
直接接合可能

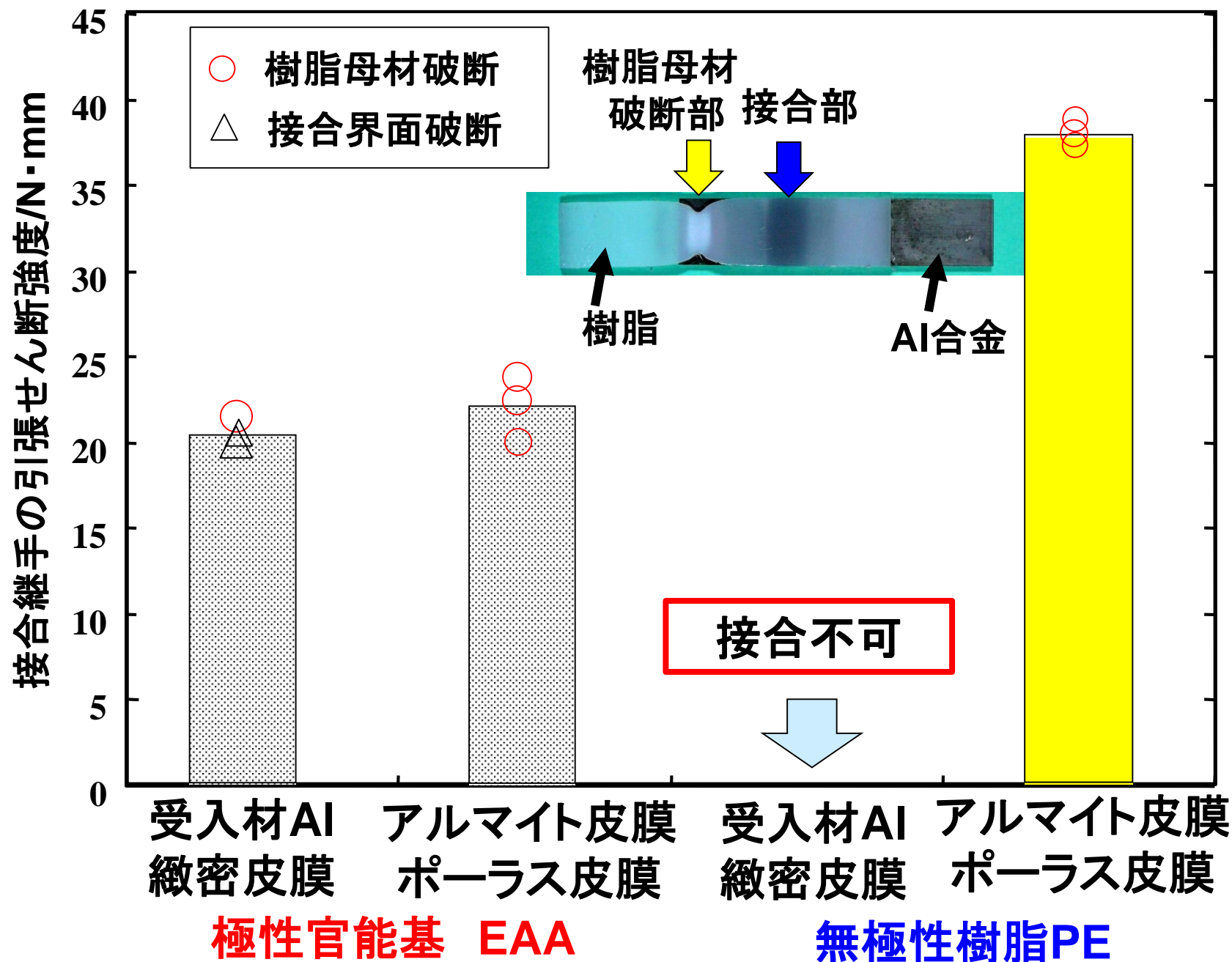
PE: ポリエチレン

無極性: 極性官能基なし

ポーラスアルマイト皮膜処理
アルミ合金では接合可能

- * アルミ合金表面特性: ポーラスアルマイト処理皮膜
- * 樹脂特性: 極性官能基

接合性に及ぼす樹脂特性とアルミ合金の表面状態の影響



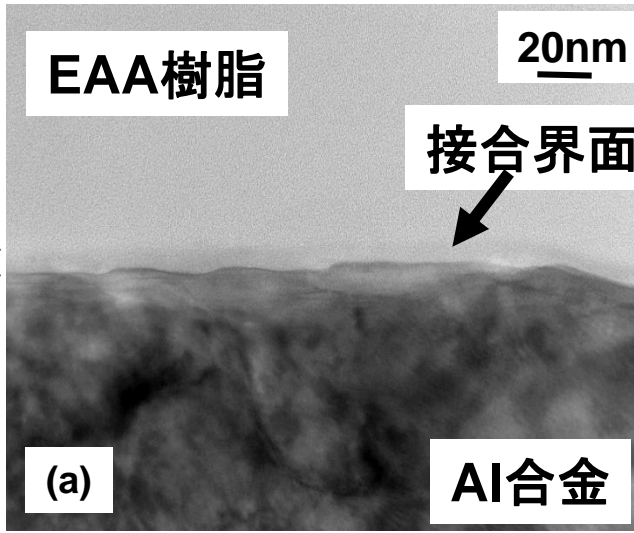
金属／樹脂の直接接合のメカニズムは？

代表的な接合メカニズム：

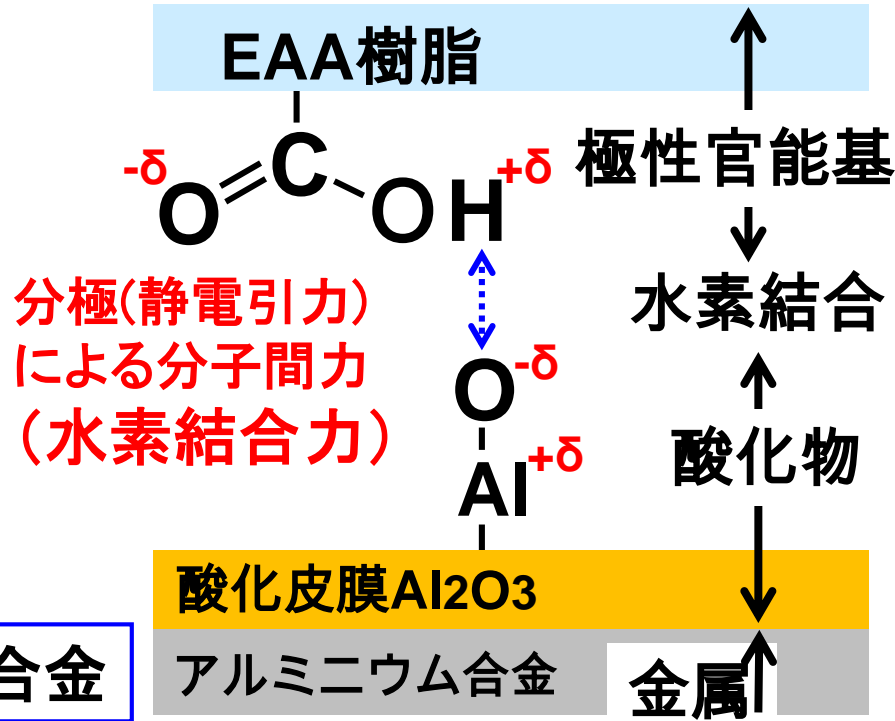
- 分子間力：ファンデルワールス力、水素結合
- 化学的結合力：共有結合など
- 機械的結合力：アンカー効果

想定される金属／樹脂の直接接合機構

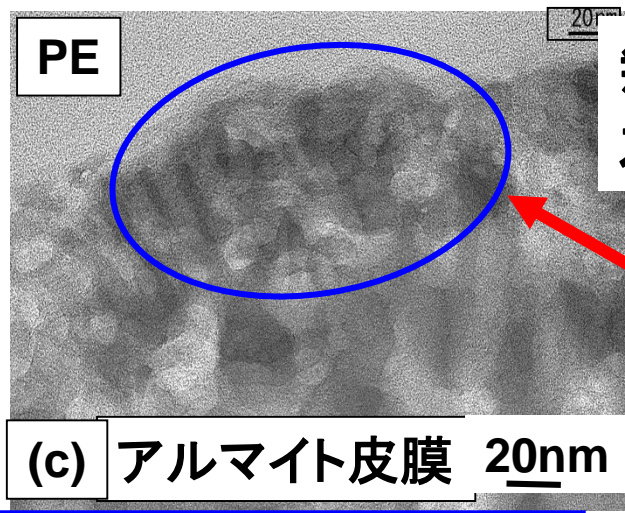
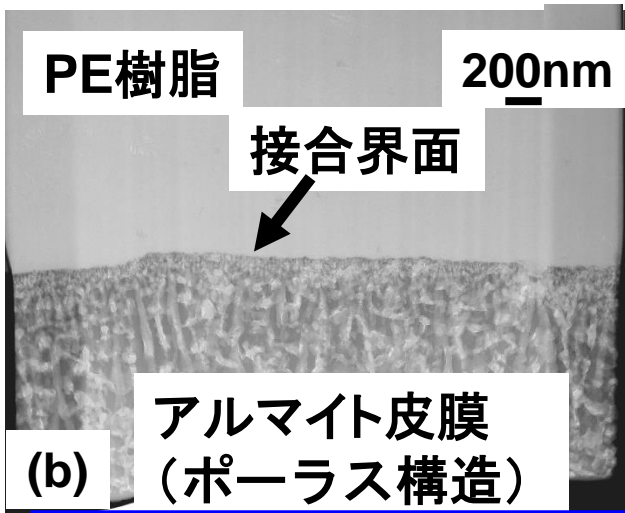
EAA樹脂：
極性官能基あり
カルボキシル基
(COOH)



6nm
酸化皮膜
(Al₂O₃)



接合界面構造：受入材のままのAl合金



無極性のPE樹脂では
水素結合はない

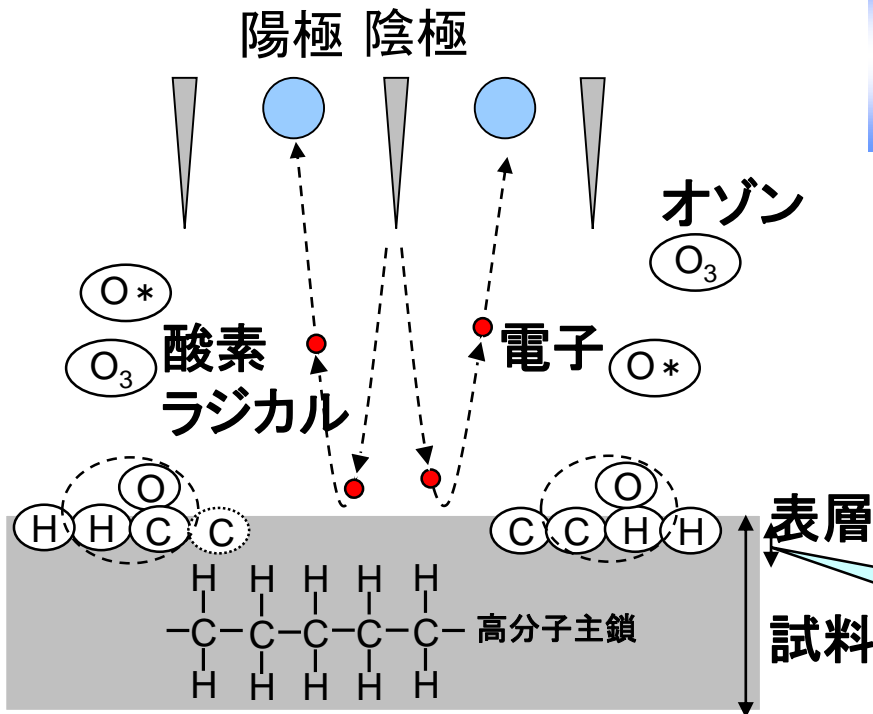
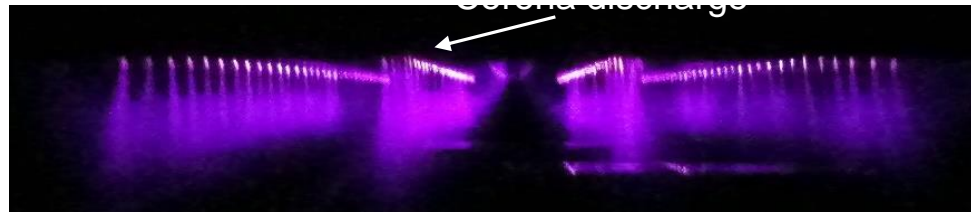
ポア内への
樹脂の侵入

アンカー効果
(機械的締結)

接合界面構造：アルマイト皮膜処理Al合金

コロナ放電処理による樹脂表面への極性官能基の付与

高周波高電圧を印加して電子を発生させ、試料表面に衝突させることで、表面に親水性の極性官能基を生成し、濡れ性、接着性を向上させる表面処理



気相中の反応:

大気中の酸素の電離、解離により酸素ラジカルやオゾン等が発生する

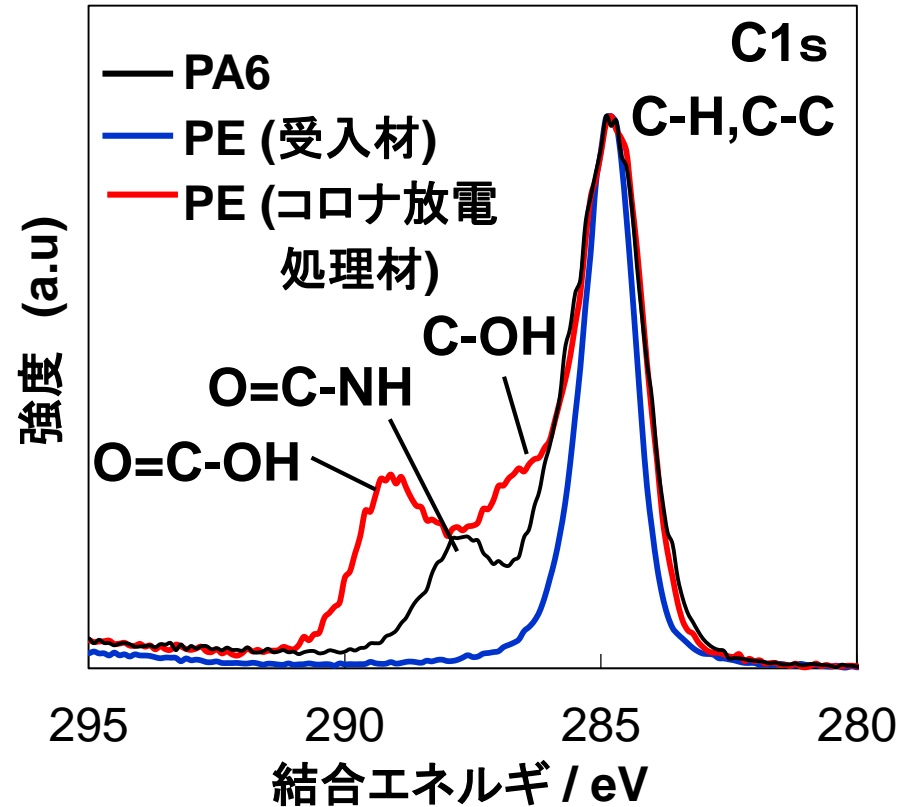
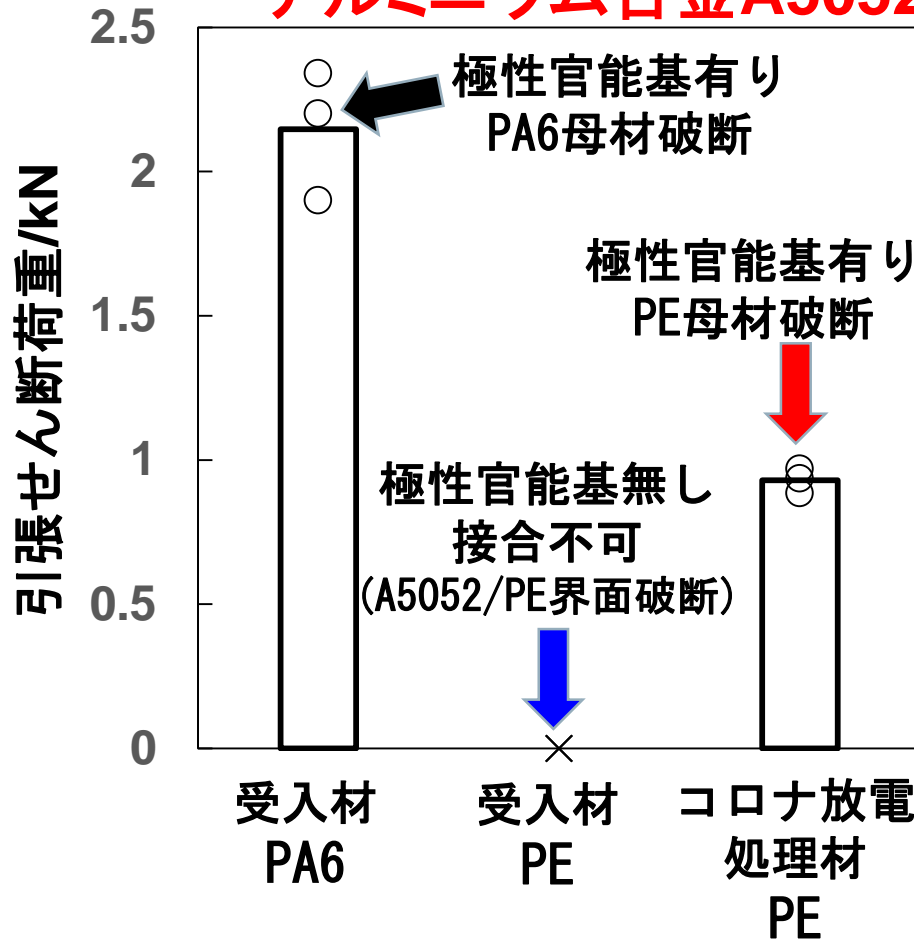
試料の反応:

- ・高エネルギー電子が表層に衝突して、高分子結合の主鎖や側鎖を切り離す
- ・切断された高分子表層と、気相中の酸素ラジカル、オゾンと再結合することで、極性官能基が付加される。

-OH, >C=O, -COOH
極性官能基

コロナ放電処理によるポリエチレンPE表面への極性官能基の付与による接合性改善

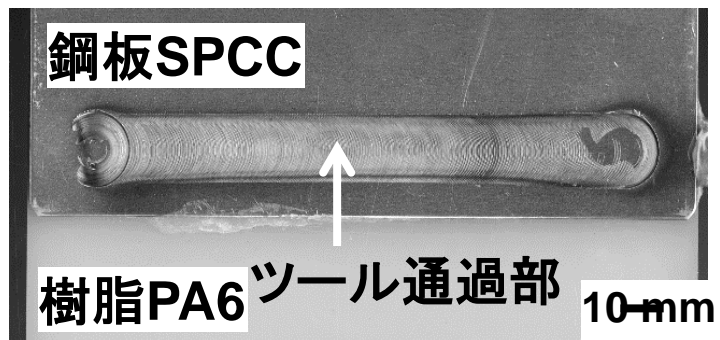
アルミニウム合金A5052 表面研磨処理材



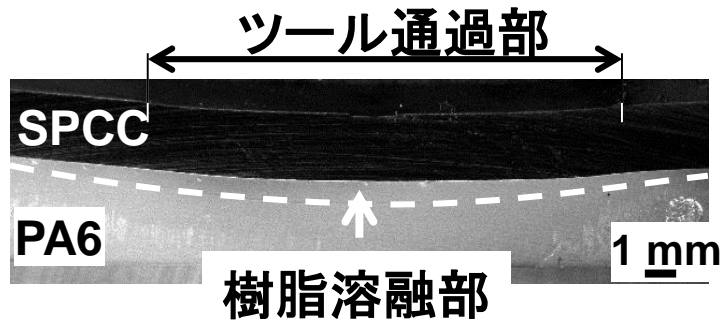
ヒドロキシル基(C-OH)およびカルボキシル基(O=C-OH)による水素結合の効果を示唆

摩擦重ね接合法による鉄鋼材料／樹脂の直接接合

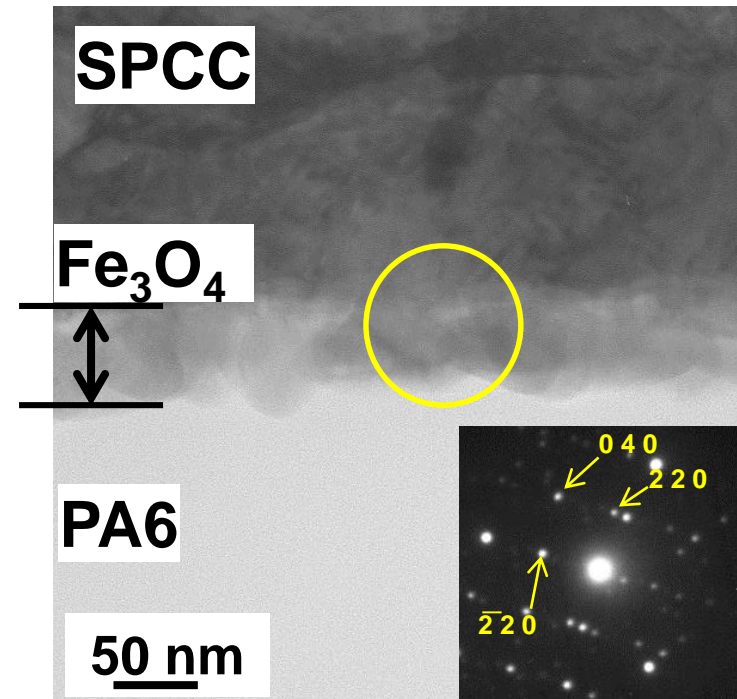
低炭素冷間圧延鋼板SPCC／ポリアミド樹脂PA6



(a) 継手外観



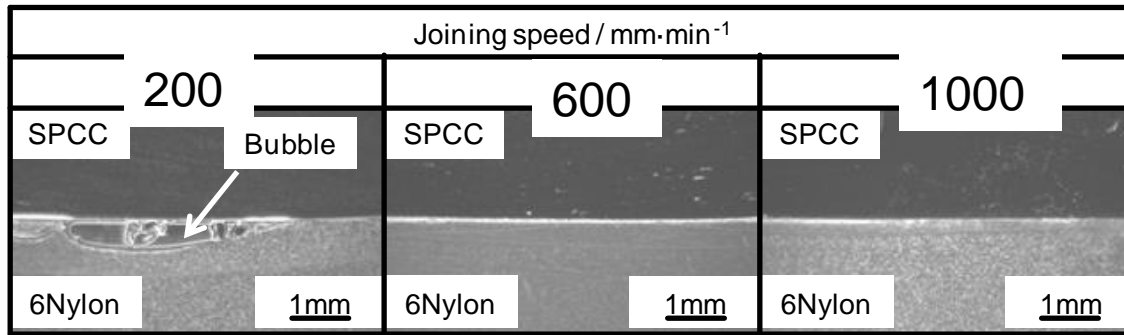
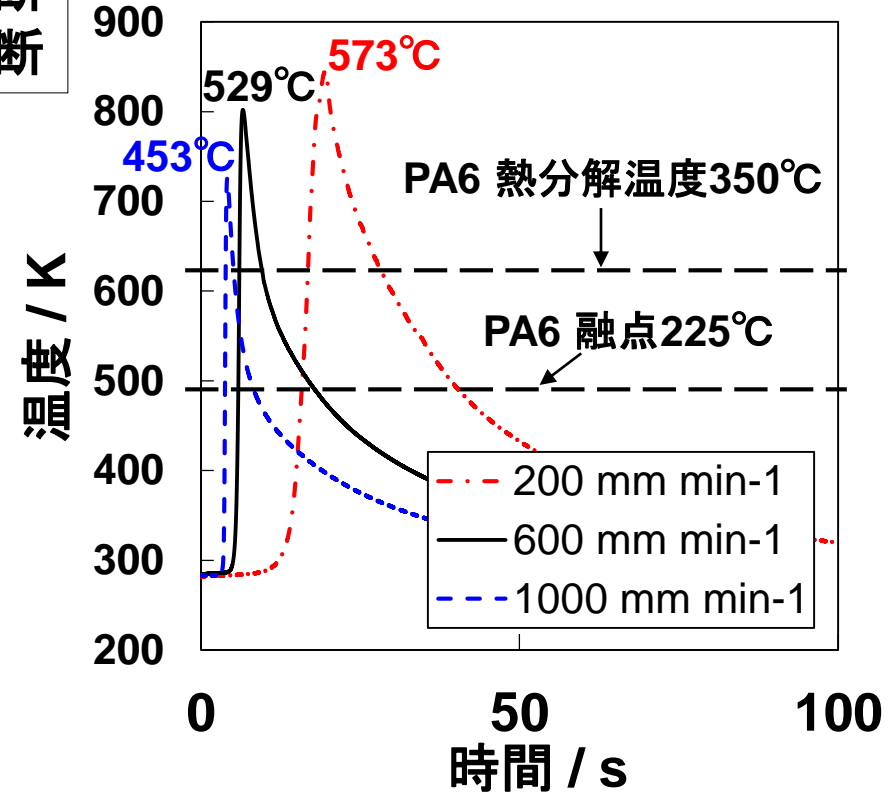
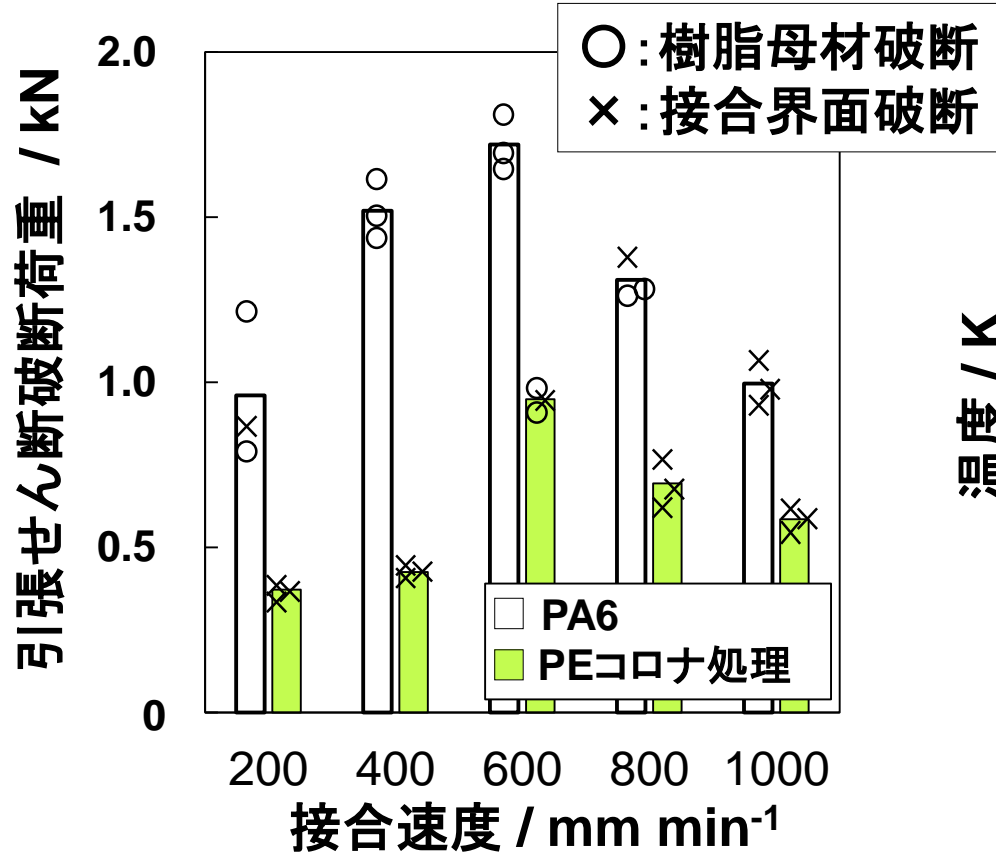
(b) 継手断面マクロ組織



(c) 接合界面微細構造

極性官能基：アミド基CONHを有するポリアミドPA6はナノレベルのごく薄い鉄酸化物層を介して接合

鋼板SPCC／樹脂の接合性に及ぼす接合速度の影響



接合部断面マクロ組織

接合速度: 最適値が存在
 低速度: 気泡と樹脂の熱劣化
 高速度: 接合面積の減少

摩擦重ね接合法による

Al合金／熱可塑性CFRPの直接接合

永塚,斧田,岡田,中田:溶接学会論文集、32(2014)235-241.

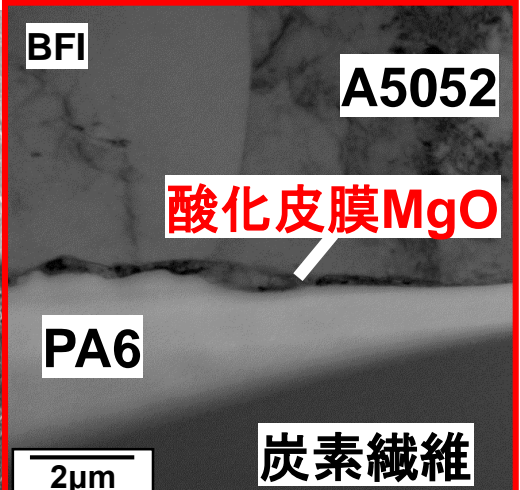
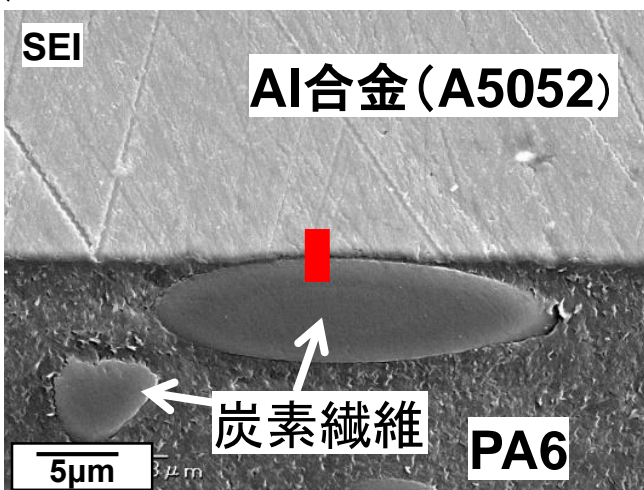
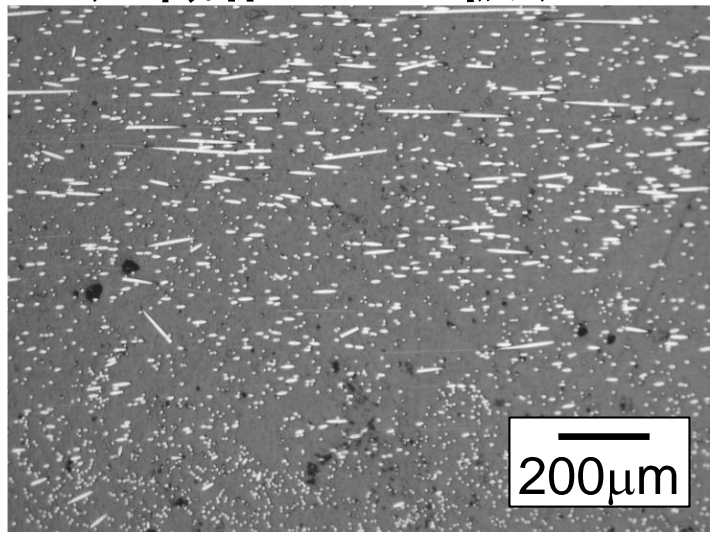
岡田、内田、中田:軽金属溶接、53-8(2015), 298-306.

K. Nagatsuka, K. Nakata ら:Composites: Part B, 73 (2015) ,82–88.

摩擦重ね接合法によるAl合金／熱可塑性CFRPの直接接合

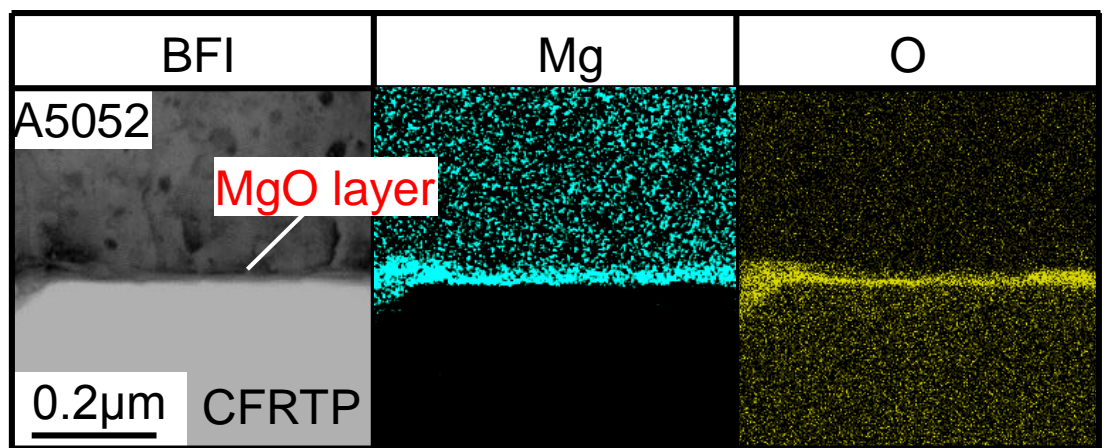
射出成形法による
短繊維CFRP板(3mmt)

接合界面構造



炭素繊維：長さ200-300µm
直径5~10µm
20wt%

マトリックス：熱可塑性樹脂
PA6



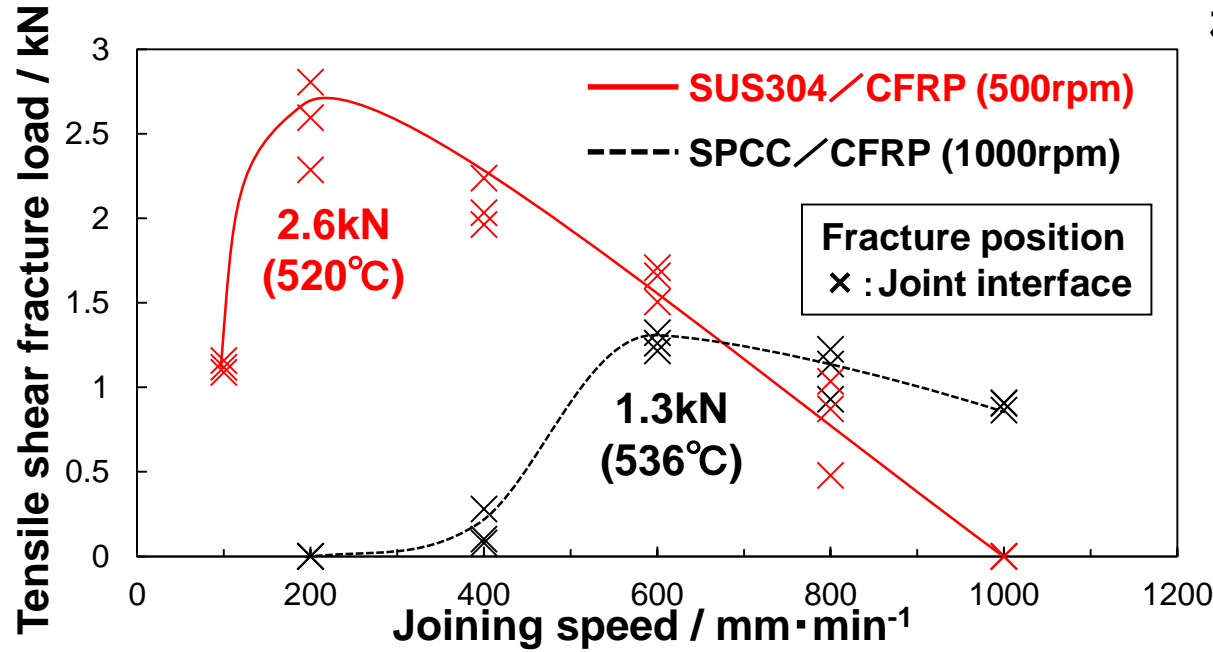
アルミニウム合金表面の酸化皮膜とマトリックス樹脂との間で接合

摩擦重ね接合法による

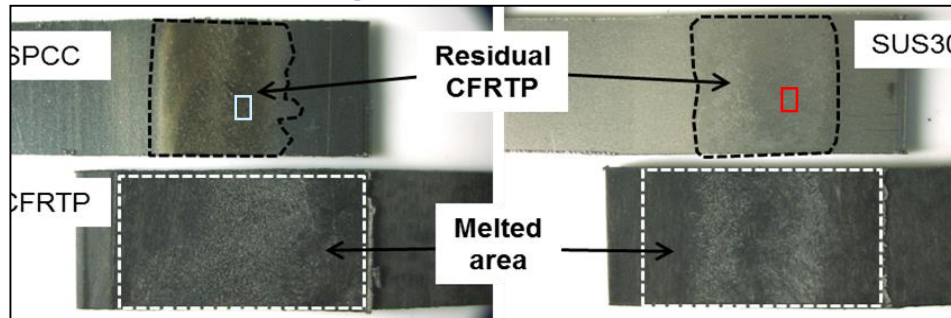
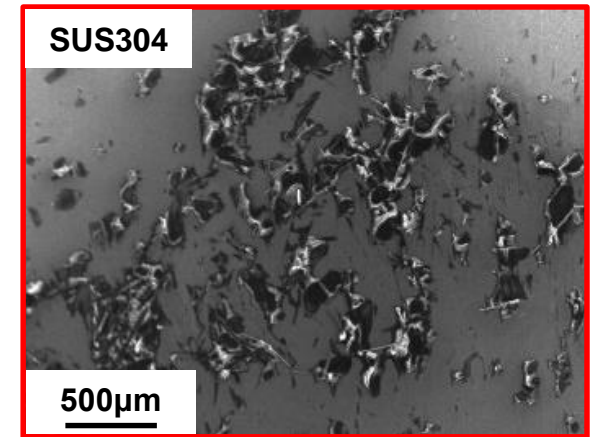
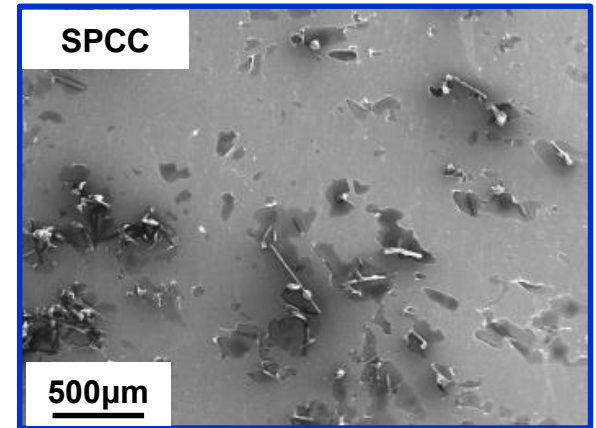
鉄鋼／熱可塑性CFRPの直接接合

K. Nagatsuka, K. Nakata ら: ISIJ International, 56-7 (2016), 1226–1231.
三輪、永塚、中田ら: 溶接学会論文集、35-1 (2017), 29-35.

鉄鋼 (SPCC, SUS304) / CFRP の接合継手強度



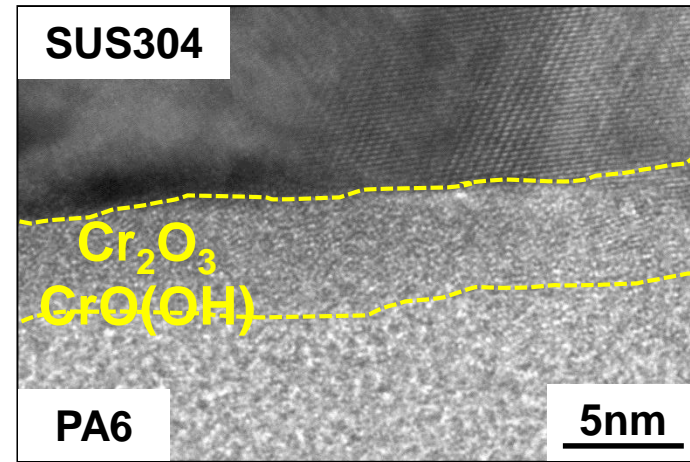
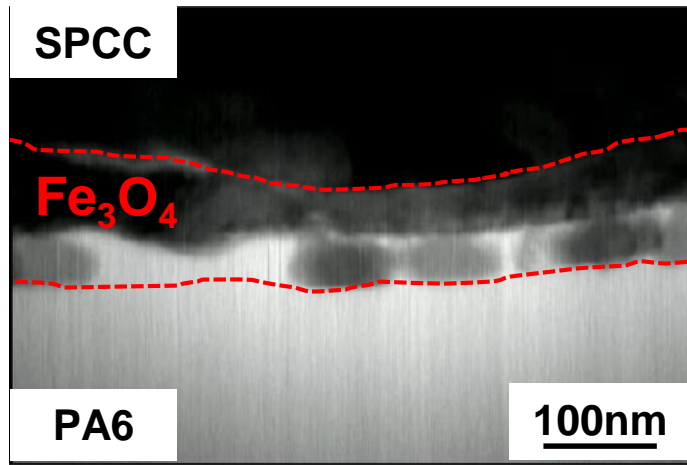
破断面の鋼板表面への付着状況



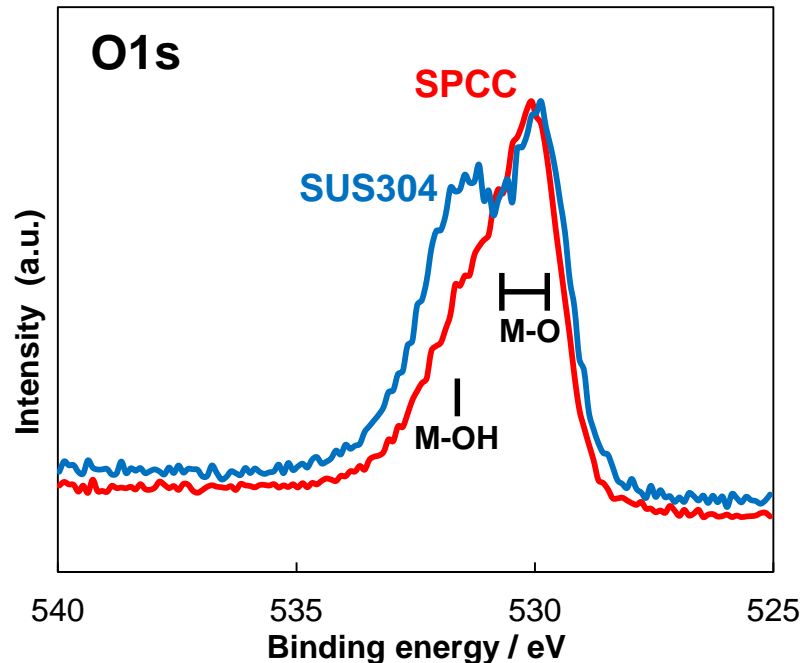
- ・最大引張せん断破断荷重: SPCC約1.3kN < SUS304約2.6kN。
CFRPの部分破断による塊状付着物は、SUS304の方が多い。
- ・最適接合速度における界面の最高到達温度は同程度、CFRP溶融面積およびマクロ的な接合面積に差異無し。

鋼材の接合界面微細構造および表面化学状態

SPCCおよびSUS304／CFRP接合断面TEM観察

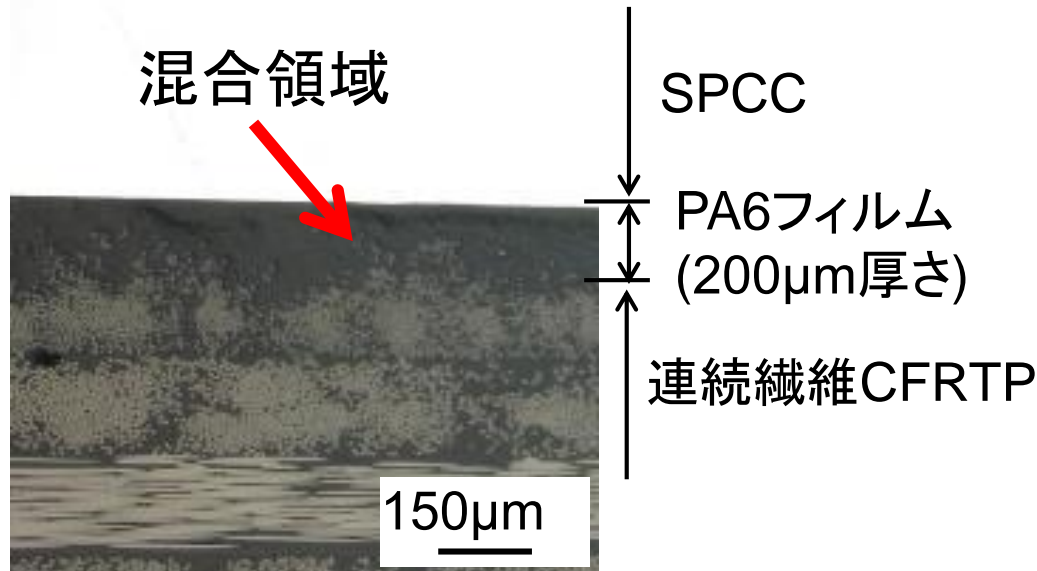
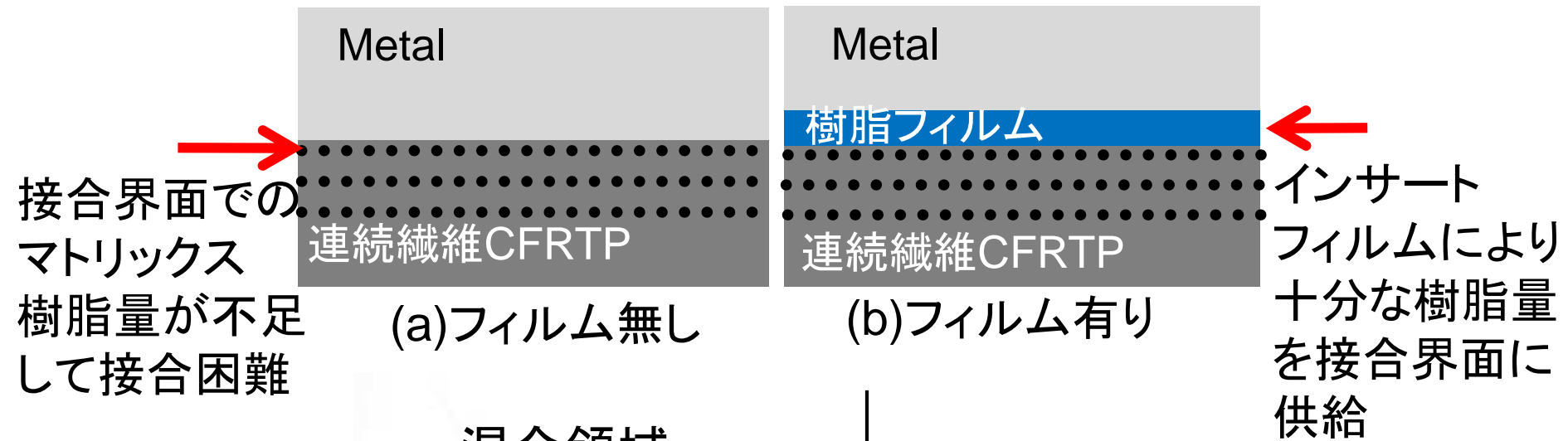


接合前のSPCCおよびSUS304表面XPS分析



- ・SPCCでは主として Fe_3O_4 、SUS304では Cr_2O_3 および水酸化物を介して、CFRPマトリックス樹脂のPA6と接合。
- ・SUS304表面からは、SPCC表面よりも多くの金属OH結合が検出。⇒金属表面のOH基により、PA6とのミクロな濡れ性が向上。
- ・酸化物中の金属の電気陰性度は、Feが1.8、Crが1.6であり、Al合金の場合(Alが1.5、Mgが1.2)と同様に水素結合力の観点からは $Fe_3O_4 < Cr_2O_3$ と推定される。

摩擦重ね接合法による鉄鋼／熱可塑性連続繊維CFRPの 直接接合

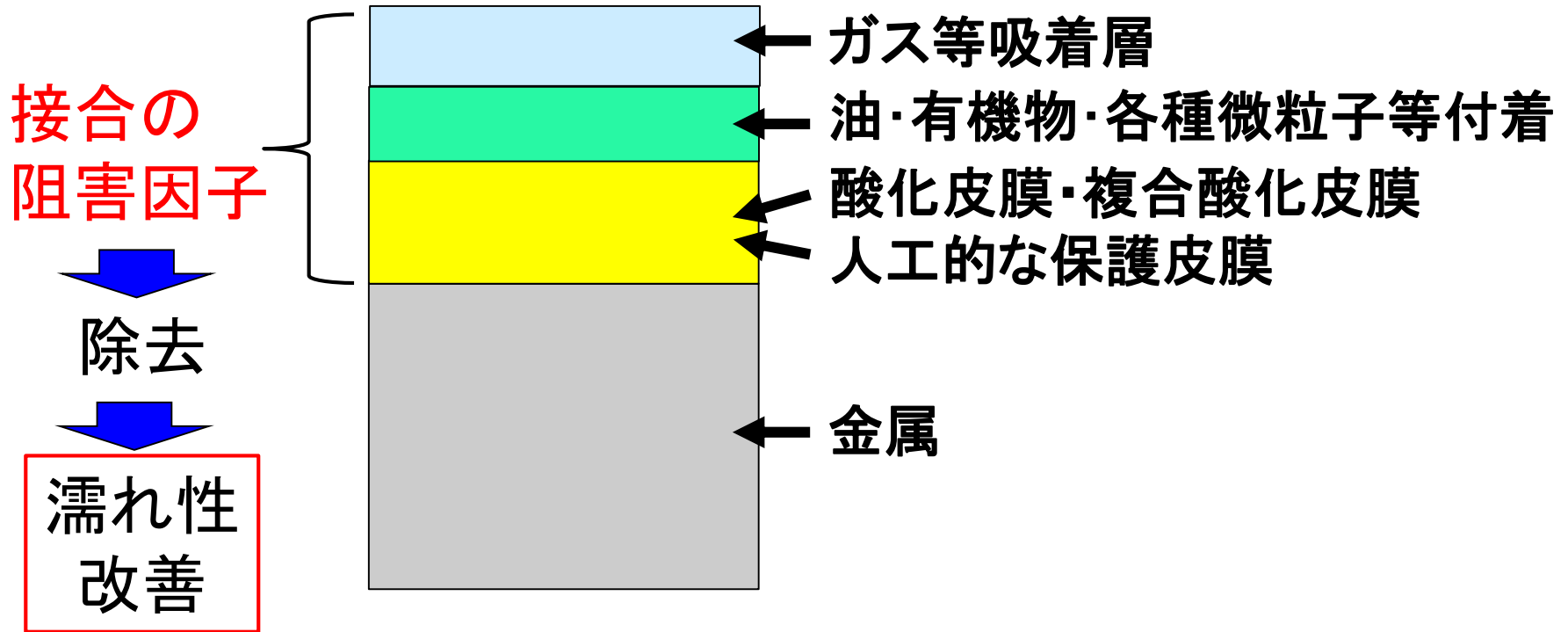


(c) インサートフィルムを用いた連続繊維CFRTP/SPCCの摩擦重ね接合界面組織

摩擦重ね接合法による
Al合金／熱可塑性樹脂・CFRPの
直接接合に及ぼす
金属の表面処理の影響

金属の表面は汚い

金属の表面には凹凸がある



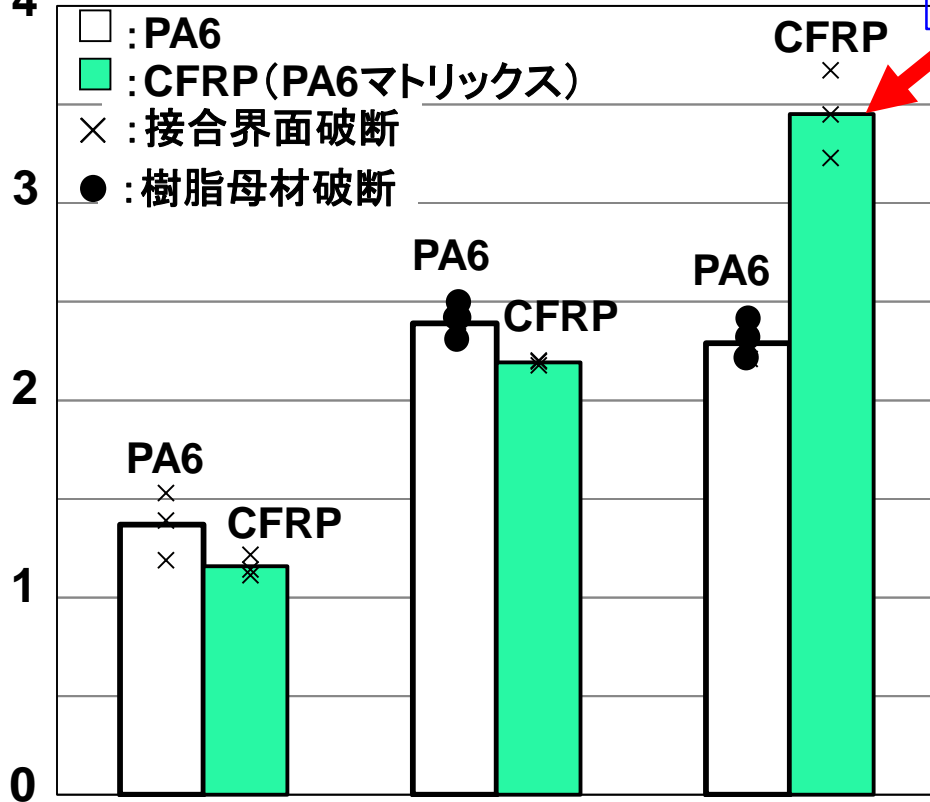
- ・物理的クリーニング：研削、ブラスト、研磨、スパッタリング
- ・化学的クリーニング：脱脂、エッチング

A5052 / PA6・CFRP接合継手引張せん断強度 に及ぼす金属表面処理の影響

幅15mmの短冊状試験片を3本試験に供した。

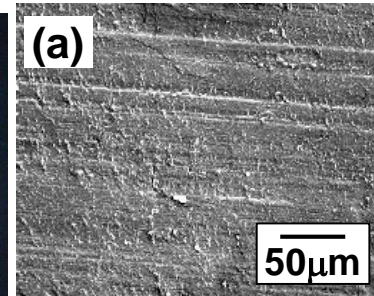
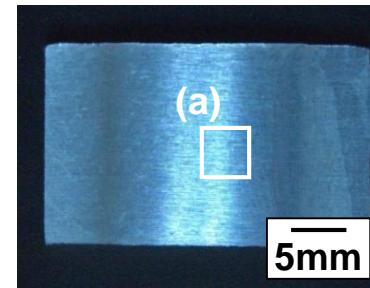
分子間力による接合の限界

引張せん断破断荷重 / kN

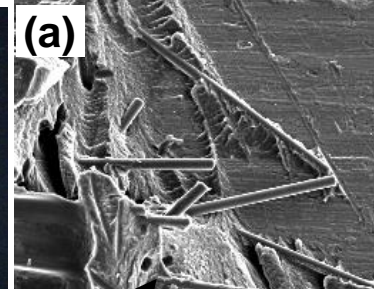
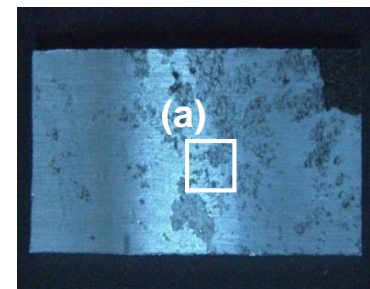


アルミニウム合金側破断面形態

未処理材



表面研磨材



CFRP母材の部分層間剥離

アルミニウム合金A5052の表面処理

FLJ条件:

ツール回転数: 2000rpm

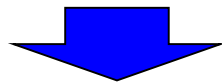
接合速度: 400mm/min

以上の結果より、

金属／熱可塑性樹脂・CFRPの直接接合は、
金属酸化物と樹脂の極性官能基との間の
分子間力・水素結合に依るところが大きい。

分子間力である水素結合から、
より強い接合強度である化学結合へ

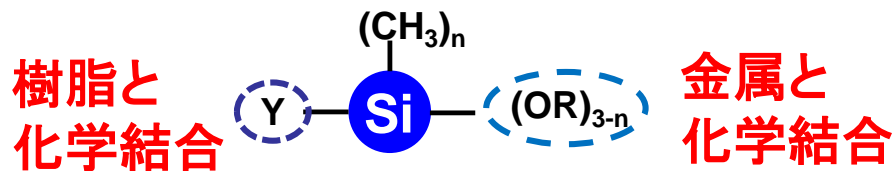
いかに、樹脂と金属との間で
化学反応を起こすか！



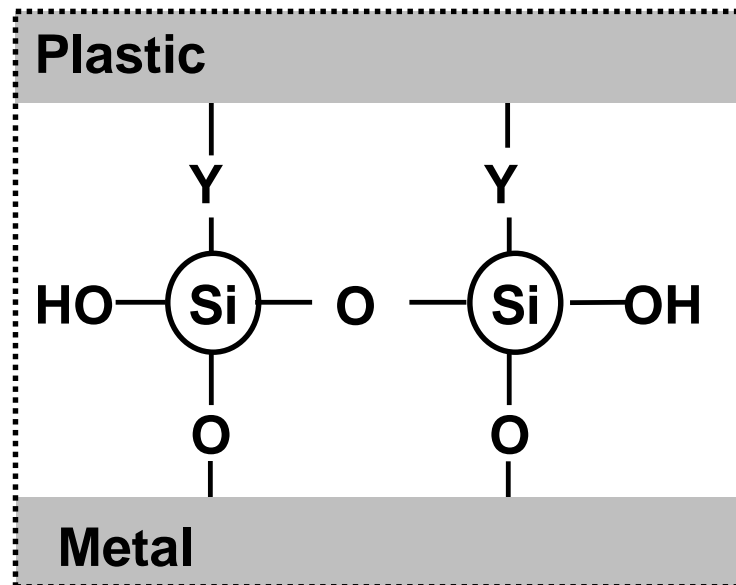
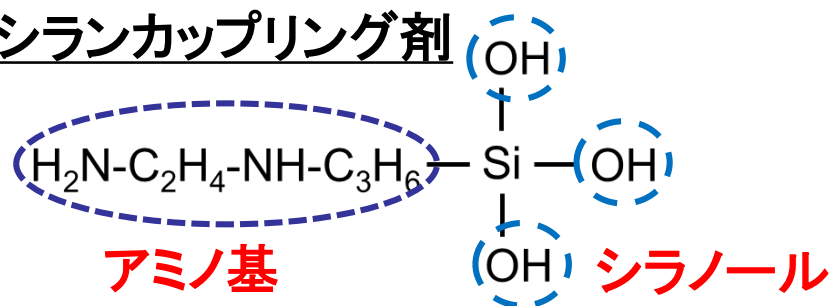
シランカップリング処理による
化学結合の導入

分子間力からより強い接合強度：化学結合力へ シランカップリング処理による化学結合の導入

シランカップリング剤



供試シランカップリング剤

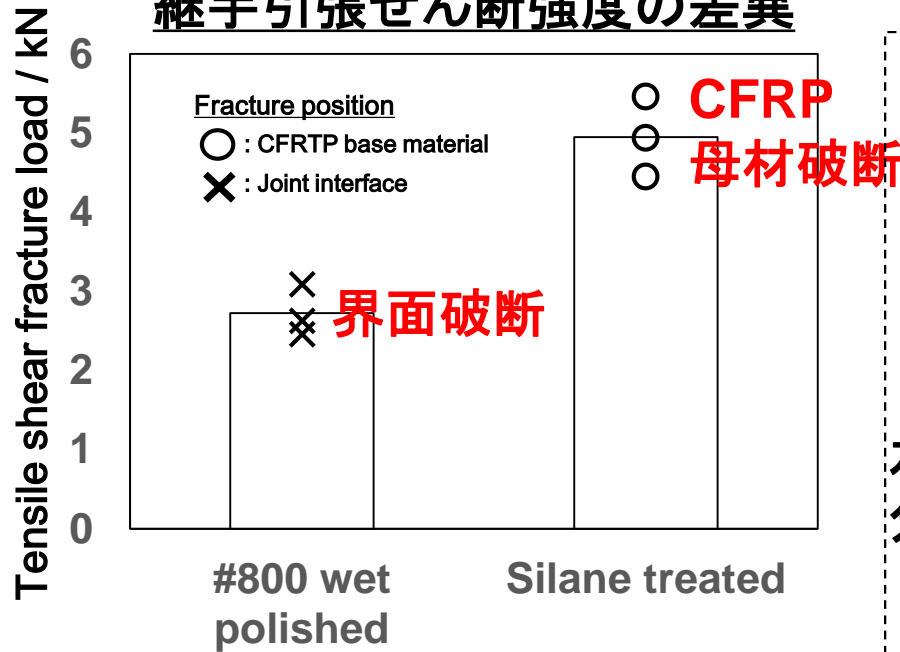


金属表面へのシランカップリング処理：アルミニウム合金、鉄鋼

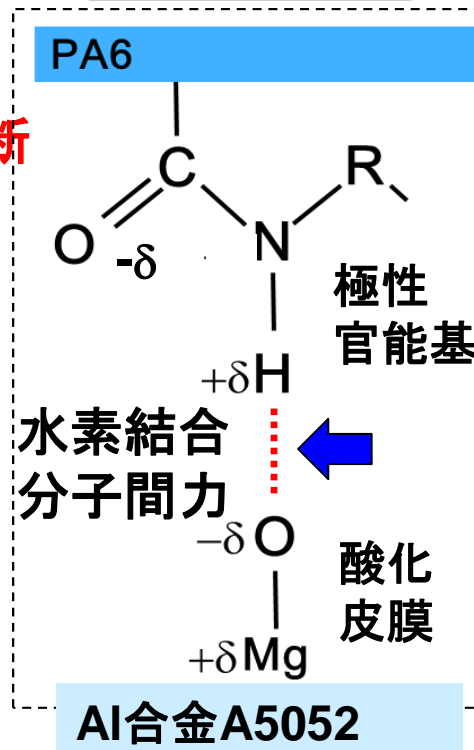
- ・#800研磨紙を用い、水中で金属板表面を研磨
- ・シランカップリング水溶液に金属板を浸漬
- ・乾燥炉内で乾燥⇒脱水縮合反応
- ・常温にて冷却
- ・それぞれの最適条件において摩擦重ね接合により接合を実施

AI合金表面へのシランカップリング処理の効果

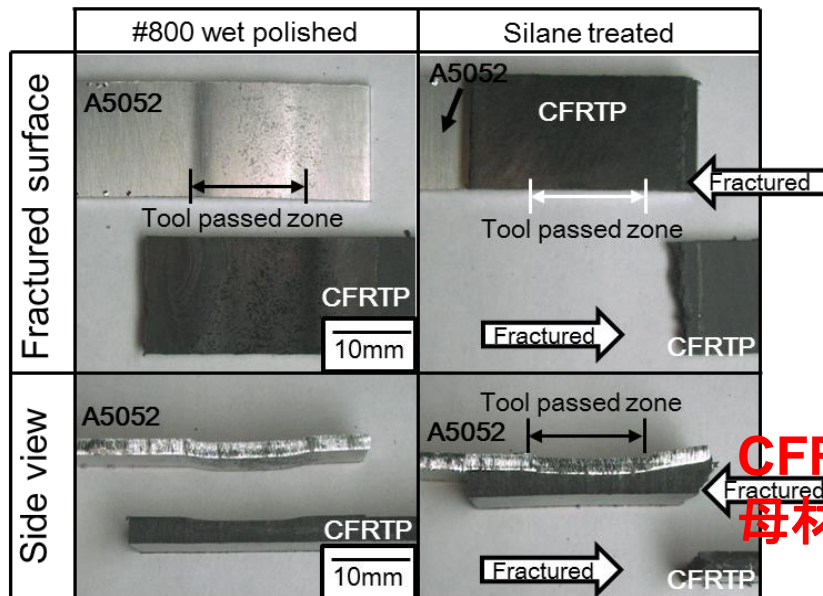
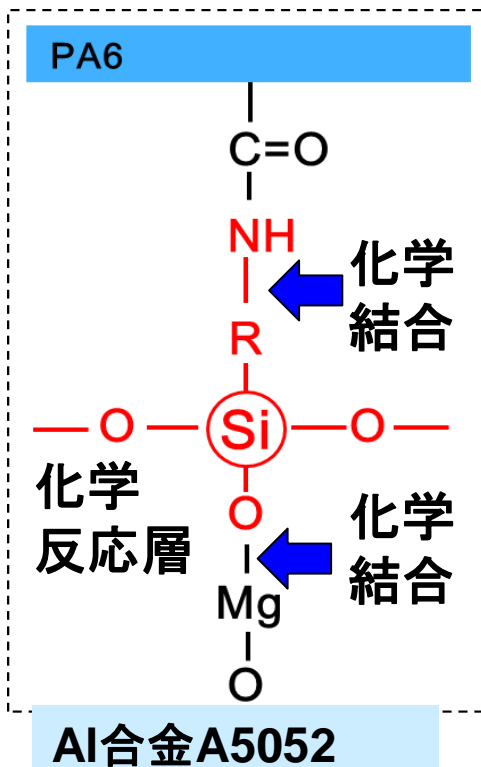
継手引張せん断強度の差異



湿式研磨処理



シランカップリング処理

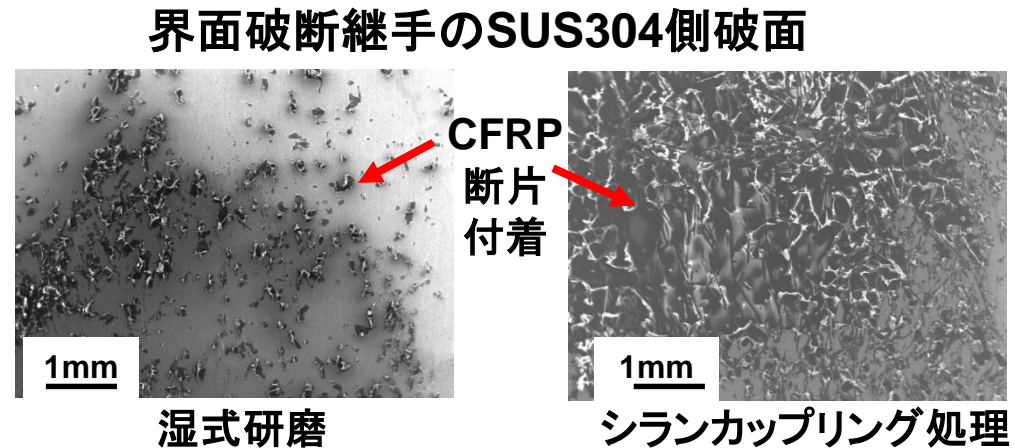
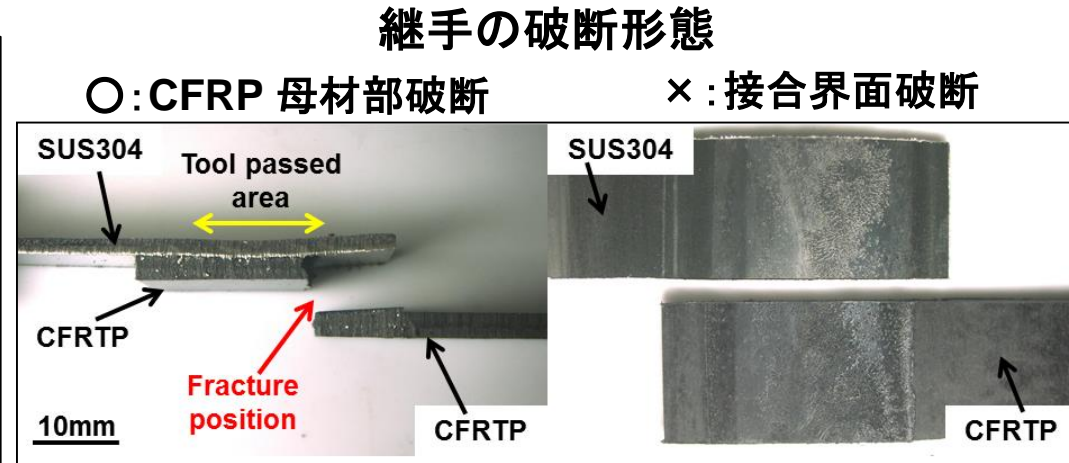
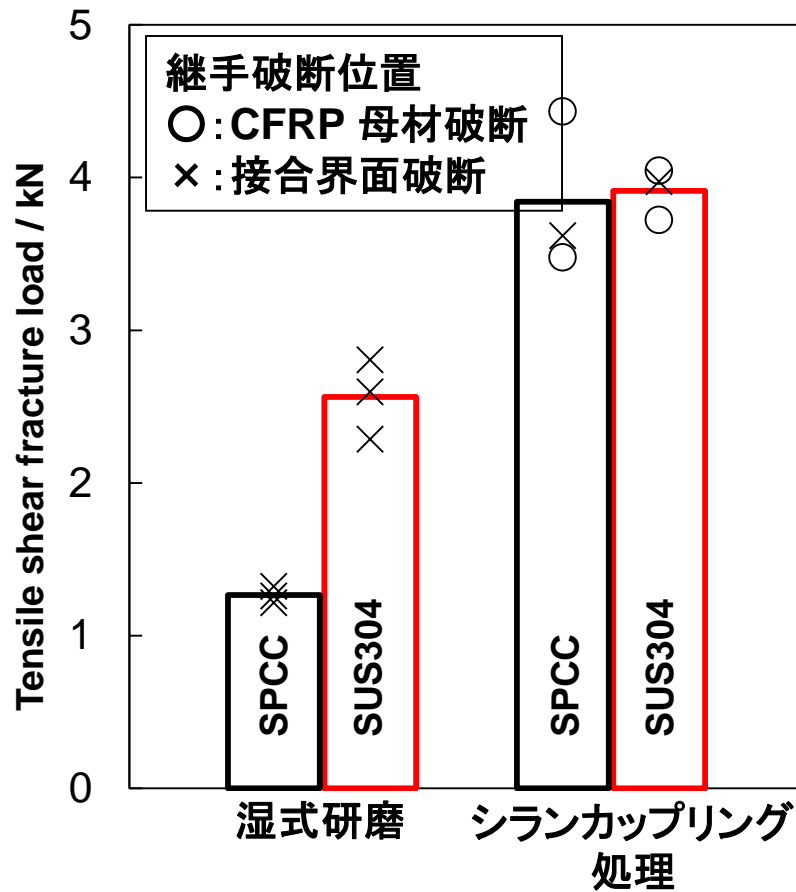


1. 水素結合
2. アンカー効果
3. (ファンデルワールス力)

1. 化学結合(共有結合)
2. 水素結合
3. アンカー効果
4. (ファンデルワールス力)

化学結合(共有結合)により
 継手強度上昇(反応層形成)

シランカップリング処理が鉄鋼の継手強度に及ぼす影響



シランカップリング処理を施すことで、SPCCおよびSUS304とCFRPの接合強度は著しく増加し、短繊維CFRPの母材部破断を呈する継手も認められた。また、界面破断であっても部分破断したCFRPの付着量が増加した。
⇒ AI合金と同様にSPCCおよびSUS304においても、シランカップリング処理の有効性が確認された。

より強い接合強度：機械的締結力・
金属表面のアンカー作用

金属表面の凹凸部に溶融樹脂が入り込み、
固化して機械的に締結接合

接合継手強度に及ぼす金属表面の アンカー効果に作用する粗面化処理

粗面化(物理的): 研磨、ショットブラスト
(凹みの径は大きく、浅い)

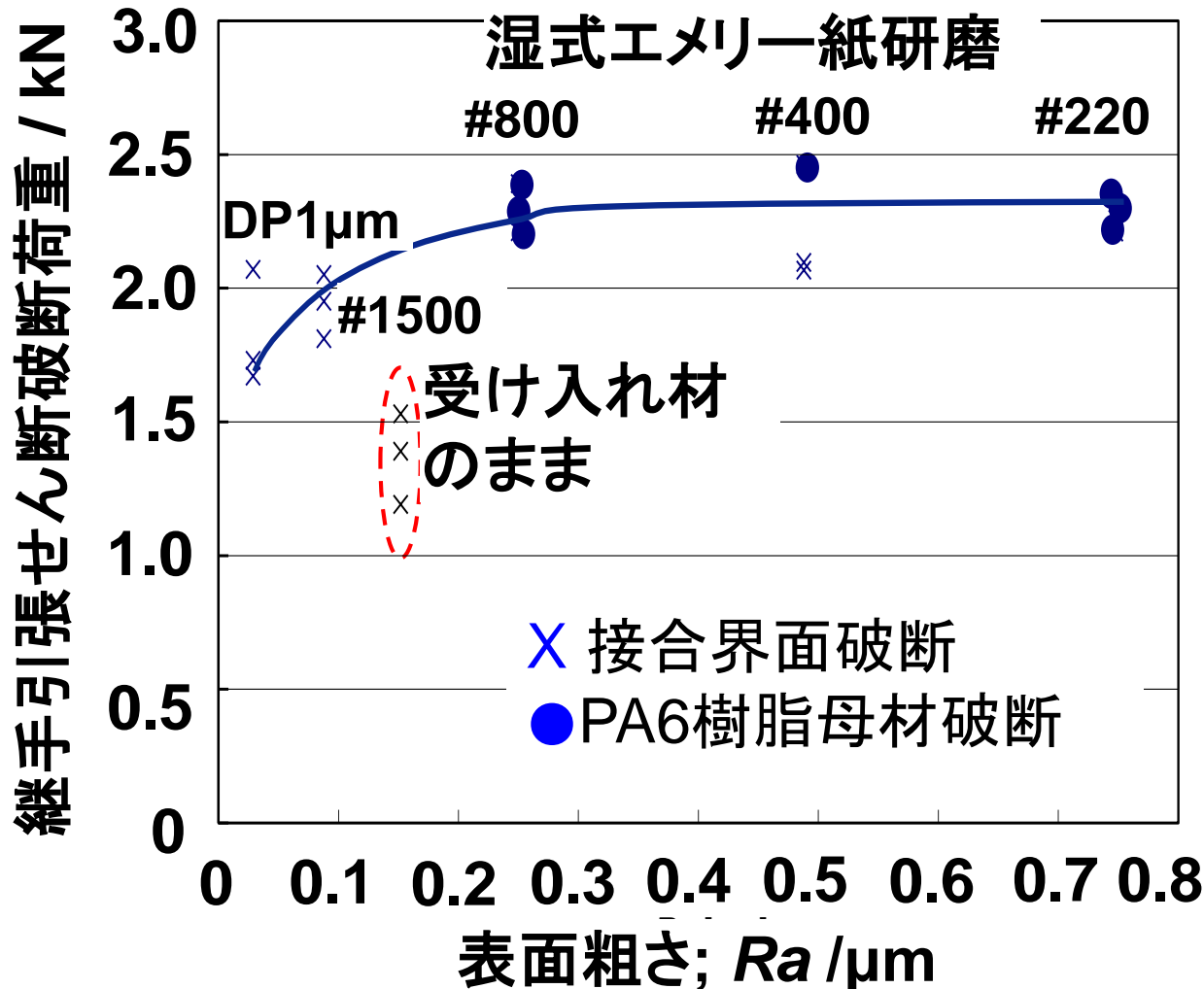
粗面化(化学的): エッチング
(孔の径は小さく、深い)

ポーラス皮膜 : 化成処理皮膜、アルマイト皮膜
(孔の径は小さく、深い)

レーザ処理 : パターンニング
(溝、穴、深い加工)
(凹凸の形状を多様化できる)

接合継手強度に及ぼす金属の表面粗さの影響

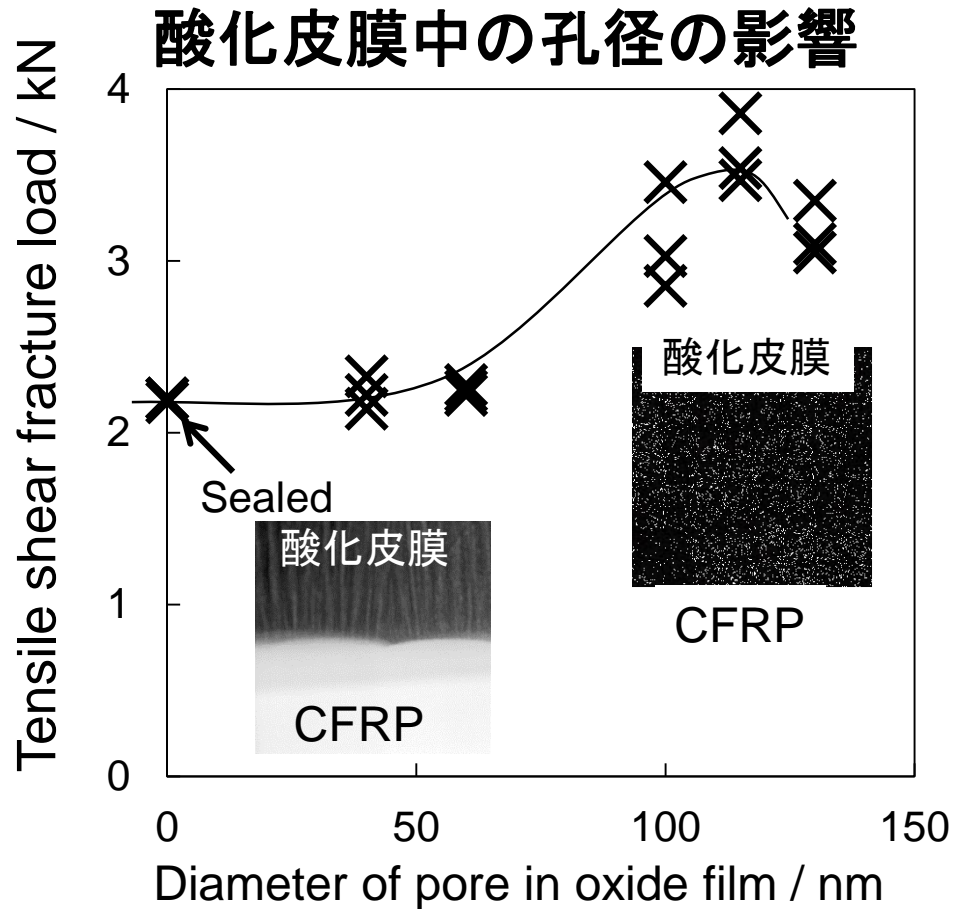
A5052 / 樹脂PA6の重ね接合継手



溝や穴の
形状が重要

研磨による表面クリーニング、接合面積増加、アンカー効果

ポーラスアルマイト皮膜処理A5052 /CFRPの 引張せん断破断強度の及ぼす孔径の影響

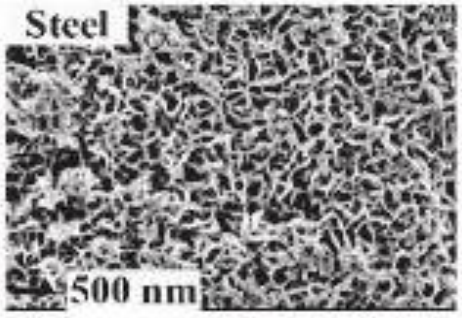
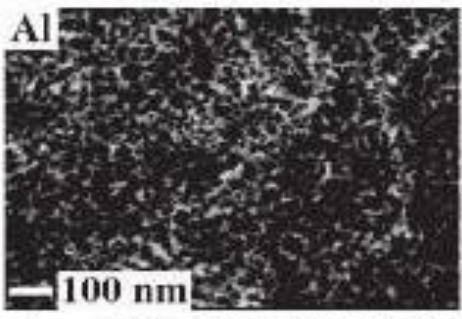


接合強度は、アルマイト酸化皮膜中の孔径が約100nm以上では、約60nm以下よりは明らかに増加した。アンカー効果が有効に作用する孔径が存在することを示唆している。

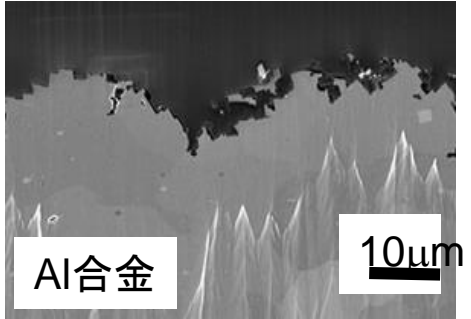
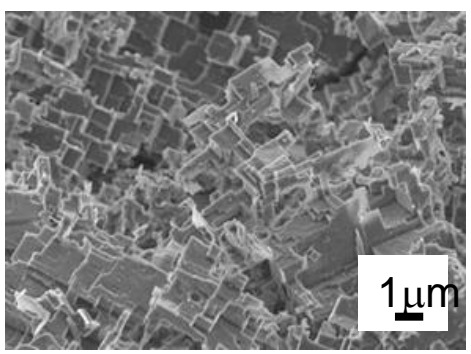
より強い接合強度: アンカー効果による機械的締結力

金属表面の凹凸部に溶融樹脂が入り込み、固化して機械的に締結

化成処理による微細凹凸形成

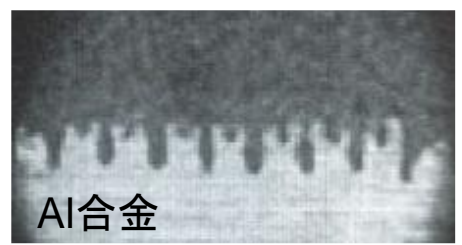
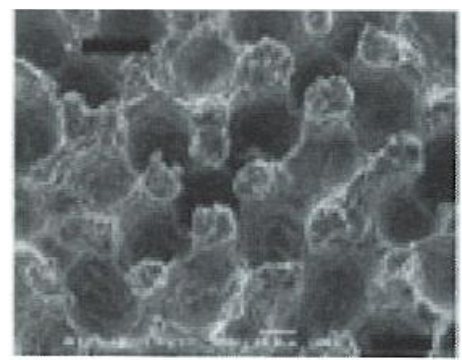


NMT処理後の金属表面形態
(数十nm深さ凹凸)

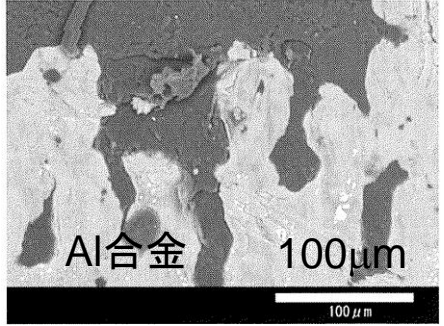
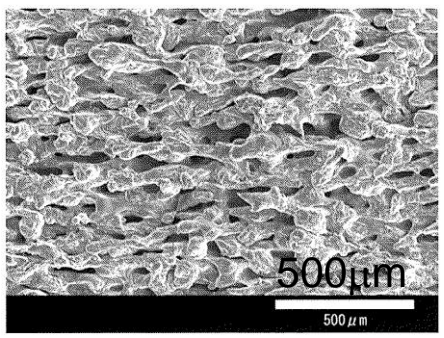


アマルファ処理後の表面形態と断面
(μm深さ凹凸)

レーザー処理による微細凹凸形成



レザリッジ処理後の表面形態と断面
(数十μm深さ凹凸)



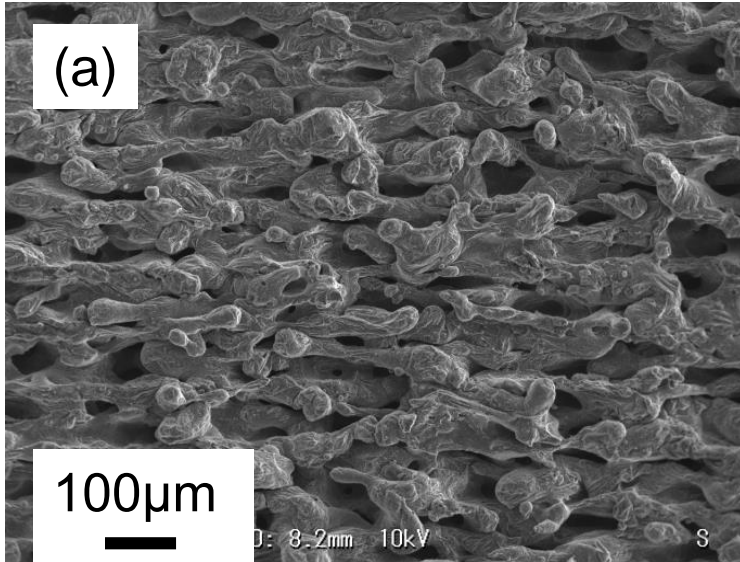
DLAMP処理後の表面形態と断面
(~100μm深さ凹凸)

金型を用いる射出成形によるインサート接合に適用され、金属/樹脂接合で25~50MPaの高いせん断継手強度が得られている。

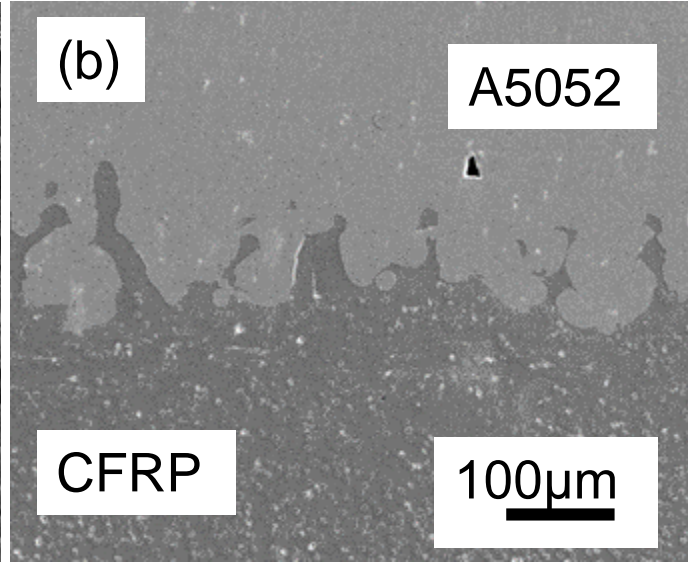
AI合金表面へのDLAMP処理の効果

摩擦重ね接合によるAI合金／短繊維CFRP継手

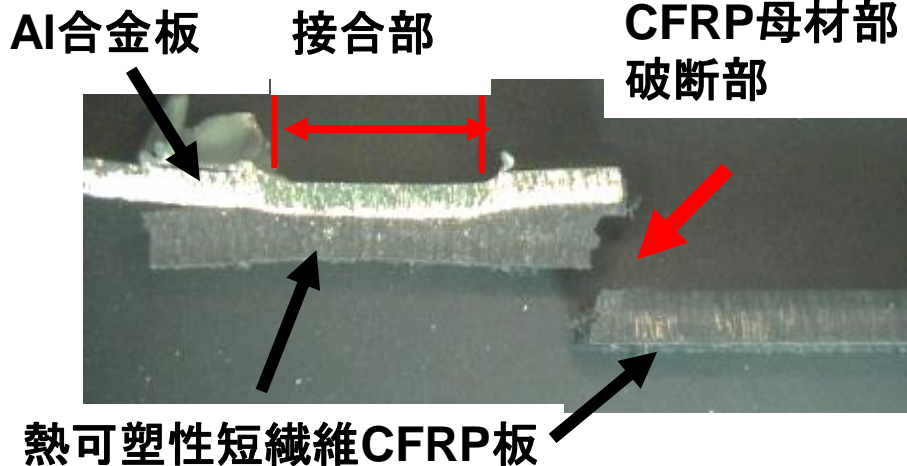
AI合金のDLAMP処理面



接合界面のミクロ組織



DLAMP処理は
ダイセルポリマ
ー(株)のご好
意による



100μmオーダーの深い穴(溝)の中に溶融樹脂(PA6)が浸入し、固化することによりアンカー効果を発揮し、引張せん断試験では短繊維CFRP母材部破断を示した

(L.H.Wu, K.Nakata et al,
Composite Structures 242(2020)112167)

金属／樹脂・CFRPの熱溶着法による直接接合のポイント：

(1)樹脂の要件：

- ①熱可塑性樹脂であること
- ②極性官能基をバルクあるいは表面に有していること

(2)金属の要件：

- ①表面に酸化皮膜層が形成されること

(3)金属の表面処理：

- ①化学反応層を形成する表面処理層(シランカップリングなど)
- ②アンカー効果を発揮する表面処理

接合機構として：

- ・水素結合：分子間力
- ・化学結合：共有結合力
- ・アンカー効果：機械的締結力

これら3つの結合力のハイブリッド化が最も効果的である

マルチマテリアル化には 接合プロセスのマルチ化が必須

接合プロセスの特徴をよく理解することが重要！

- ①対象材料への適用性：
(接合継手特性：材質的、力学的、化学的)
- ②対象部材の特性：板厚・形状等
- ③接合部の品質評価技術(特に非破壊検査)の確立
- ④接合設備の設置可能場所等
- ⑤接合設備コスト
- ⑥維持費(消耗品、メンテナンス)
- ⑦自動化・IoT化等

ご清聴有難うございました

本講演内容のうち、金属／CRFPの摩擦重ね接合FLJに関する研究結果は主としてNEDO未来開拓研究「革新的新材料等研究開発」によるものであり、謝意を表します。

講演参考資料：

- ・ 中田一博：『マルチマテリアル時代の接合技術
—異種材料接合を用いたものづくり—』
産報ブックレット1、産報出版（株）
B5版63ページ、本体価格800円
- ・ 中田一博：「摩擦攪拌接合で得られた異種材料接合界面の組織形成」金属、88(2018)No. 6, 471-480.
- ・ 中田一博：「異種材料接合の現状と金属／樹脂・CFRP直接接合の展開」自動車技術、72(2018)No. 11, 45-50.

連絡先：nakata@jwri.osaka-u.ac.jp