

軽金属と多様な材料との異材接合に 関わる科学技術の発展と普及

大阪大学 名誉教授

大阪大学 接合科学研究所 招へい教授

中田 一博

協会賞受賞記念講演

一般社団法人軽金属溶接協会

2022年1月27日

異材接合に関する研究及び普及活動(1)

軽金属溶接協会活動:

- (1)異材接合委員会 委員長(平成20~28年度)
- (2)異材接合に関するJIS開発委員会 委員長(平成26~28年度)
 - ・JIS規格制定:規格番号 JIS Z3175
 - 規格名称「摩擦圧接による異種金属継手の試験方法及び継手品質評価の分類」

省庁等:

- (1)平成23年度NEDO調査「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」委員会 委員長
- (2)特許庁 平成25年度特許出願技術動向調査
「構造材料接合技術に関する特許出願動向調査委員会」委員長
- (3)NEDOプロジェクト「革新的新構造材料等技術開発」:
 - ①「鋼材/CFRP等樹脂材料の接合技術開発」平成25~29年度
 - ②「アルミニウム/CFRP接合技術の開発」平成25~29年度
 - ③「Mg/Al異材接合の組織と機械的特性」平成28~29年度

異材接合に関する研究及び普及活動(2)

(1)学術論文(査読付):

- ①金属／金属との異材接合:49件
- ②金属／樹脂・CFRPとの異材接合:15件
- ③金属／セラミックスとの異材接合:8件

(2)学術雑誌等解説:29件

(3)著書(含監修、共著、分担執筆):12冊

(3)学協会、地方公設試等各種団体における
セミナー等講演:43件

謝 辞

今回の協会賞授賞の対象となった研究・活動内容につきましては、軽金属溶接協会や大阪大学接合科学研究所の関係各位、共同研究を行って頂いた学生・大学院生、共同研究員・受託研究員ならびに企業関係者やNEDOなどからのさまざまなご協力、ご支援の賜物であり、ここに改めまして関係各位に対しまして厚くお礼を申し上げます。

以下、異種材料接合に関する体系的な取組みを行ってきた研究内容を含めて、軽金属溶接協会年次講演会(2017年6月)での基調講演「異材接合の接合機構」並びに協会誌解説記事「アルミニウムと樹脂・CFRPとの熱圧着機構」(軽金属溶接、第59巻(2021)、3号、81-89)に基づき、その概要を紹介する。

軽金属と異材接合研究の時代背景

地球温暖化対策に向けたCO₂排出規制



自動車等輸送機器の軽量化
マルチマテリアル化

構造用材料

金属(鉄鋼、非鉄)／高分子(樹脂)、CFRP
／セラミックス(ガラス)



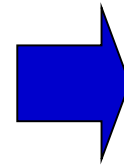
異種材料接合技術

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

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）

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

接合プロセスの異材接合への適用性

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	◎	△	×	×
		電子ビーム溶接	◎	○	×	×
		レーザ溶接	◎	○	◎*	×
	ろう付	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	◎	◎	◎	△

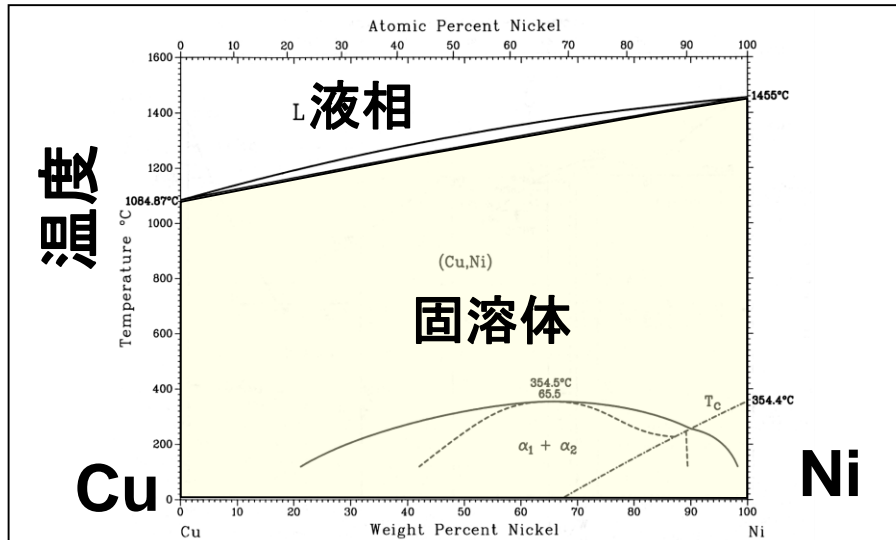
異材接合の可能性：◎高い、○材料に大きく依存、△低い、×不可、*加熱用熱源

(中田作成)

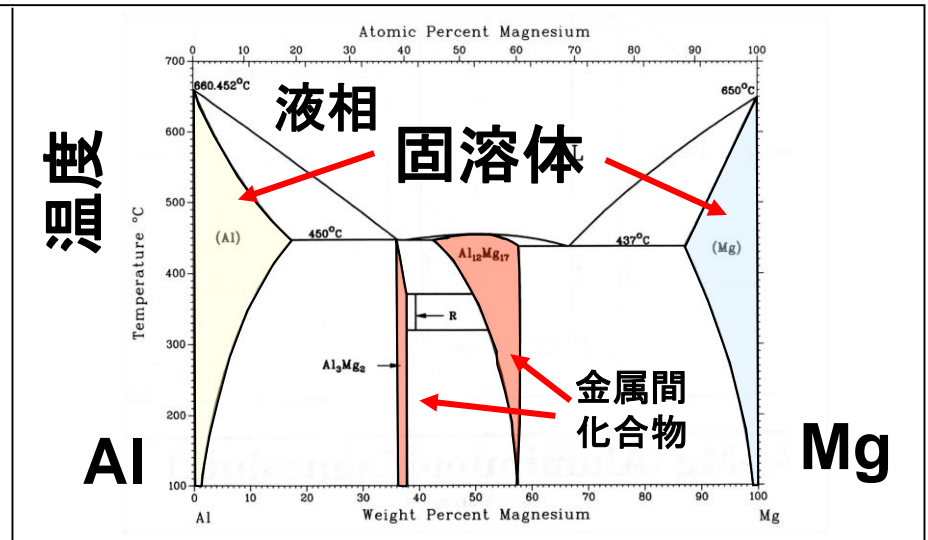
金属材料における異種材料 接合の可能性

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

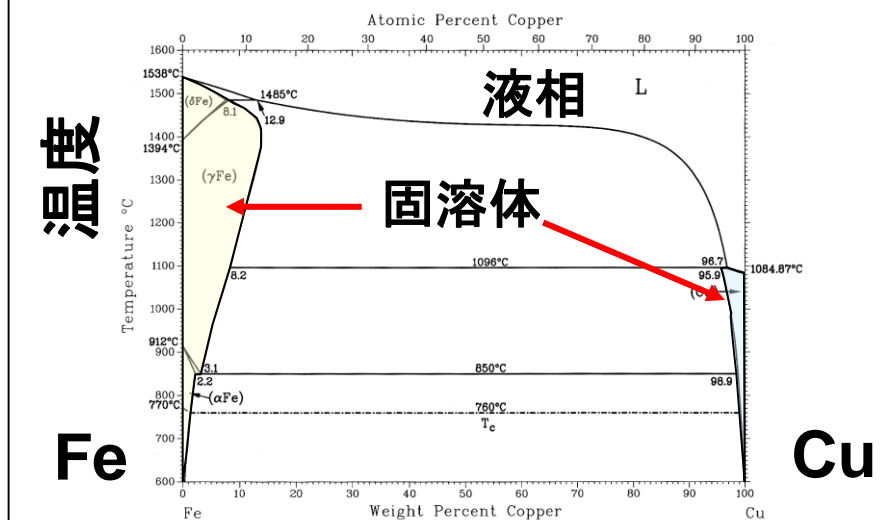
接合界面組織が固溶体か、金属間化合物かで接合性が決まる



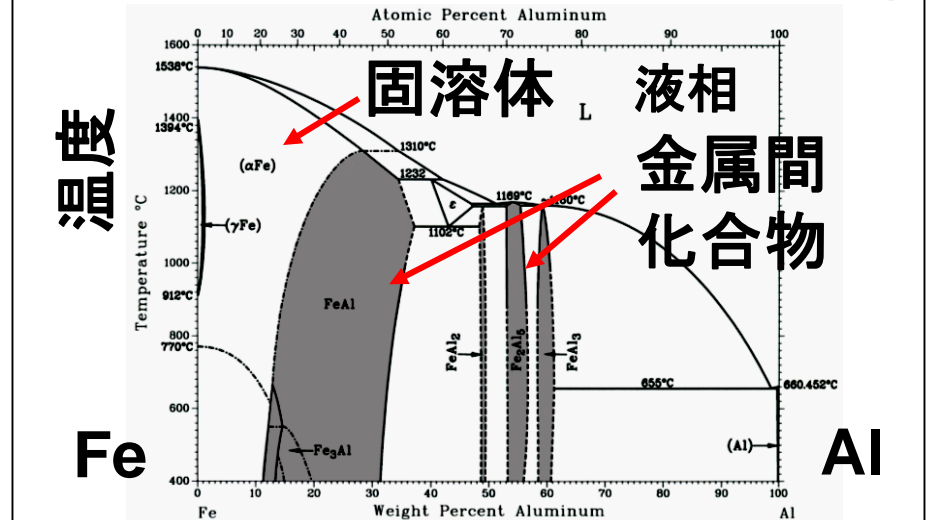
(a) 全率固溶体 Cu-Ni



(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

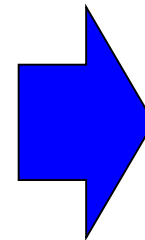
第1世代：同種金属基(合金)同士の接合

- ・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

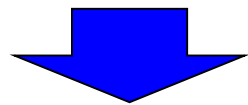
第2世代：異種金属基（合金）間の接合

- ・異なる種類の金属とその合金間の異種材料接合
- ・金属の種類のコム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

a

鋼板／Al合金の異材接合：機械的締結と接着剤



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

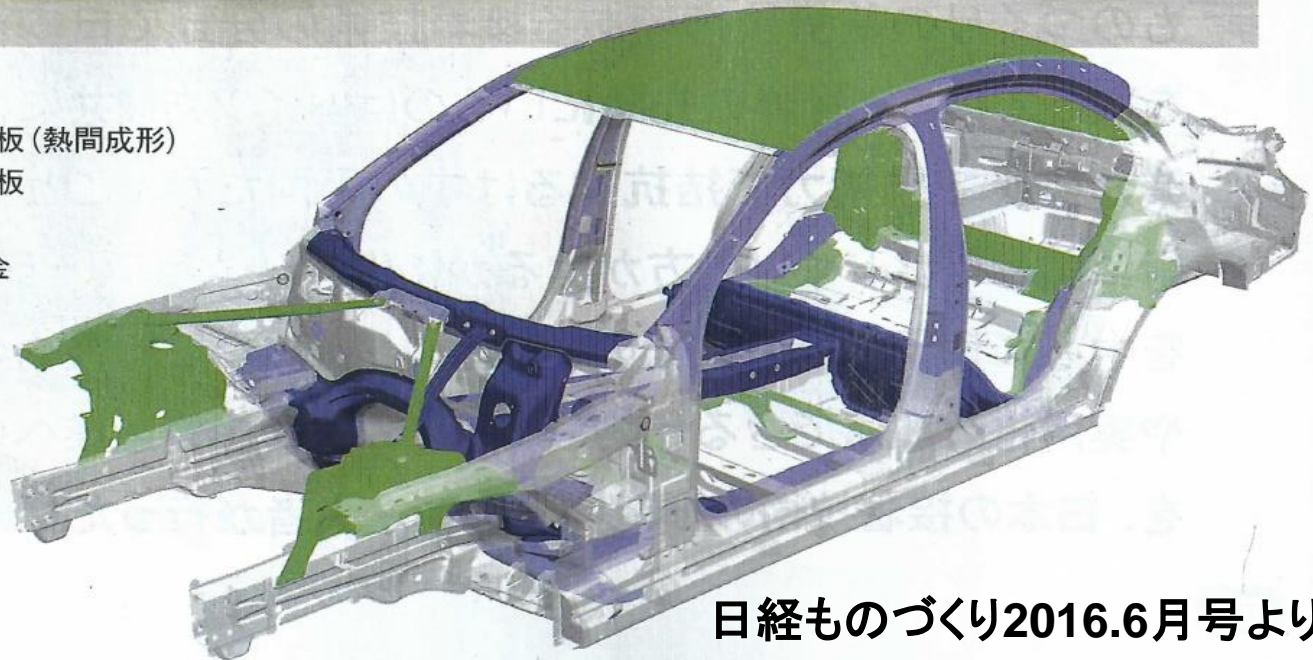


図1 Daimler社の「メルセデス・ベンツCクラス」

(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。

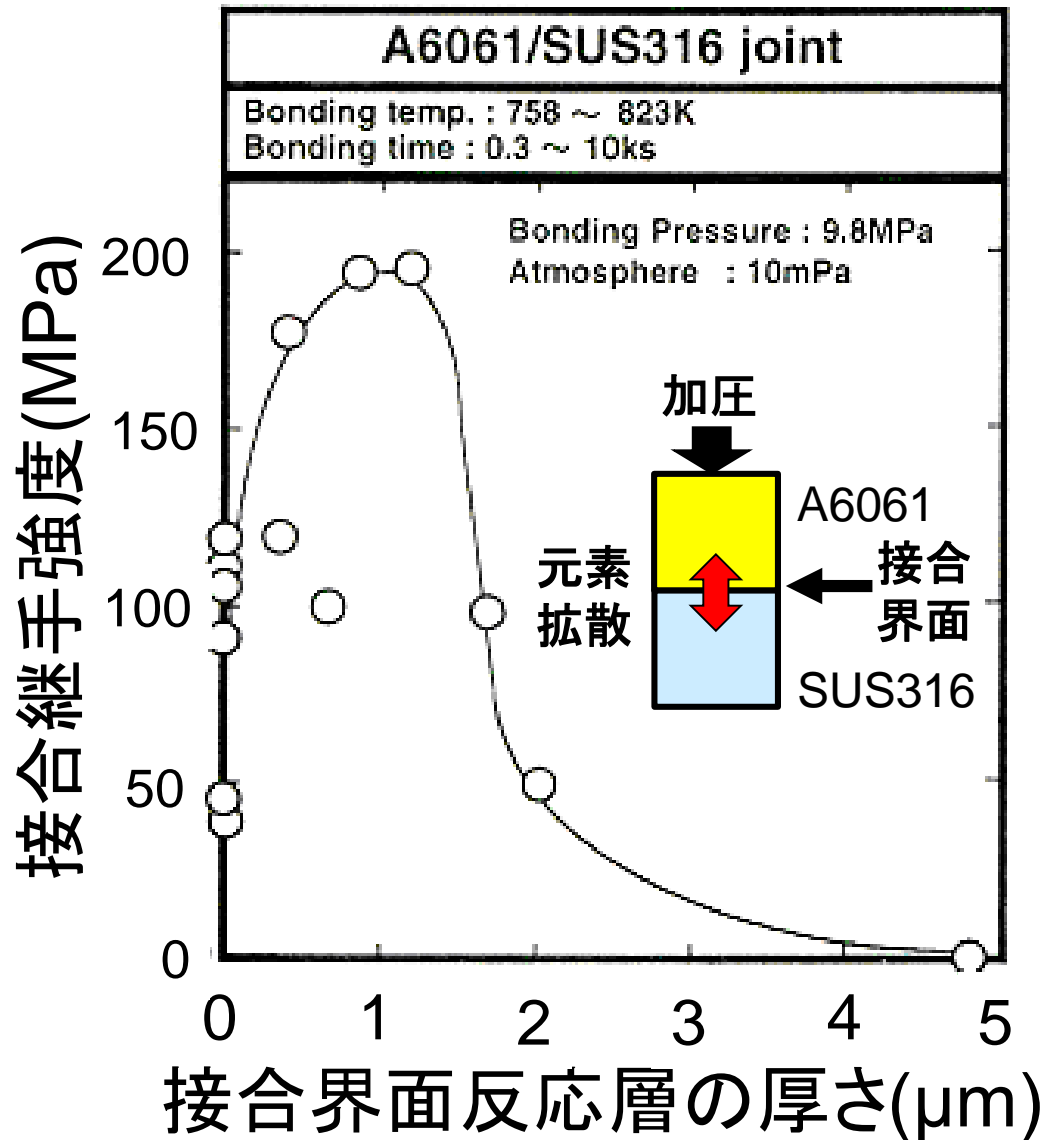
アルミ合金と鉄鋼の直接異材接合が可能な 接合界面構造（過去の文献等からの取り纏め結果）

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）

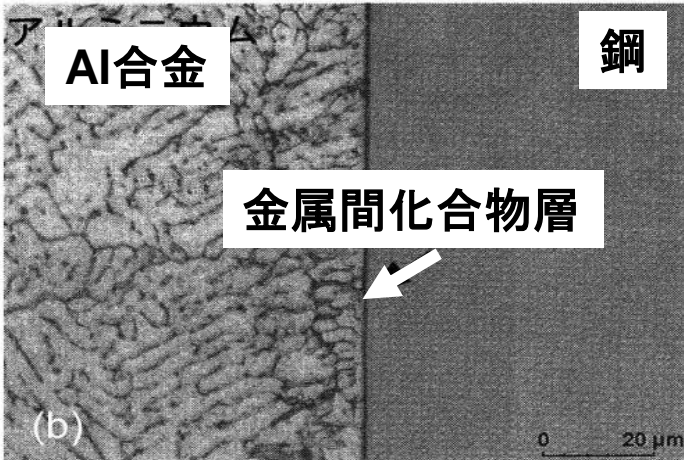
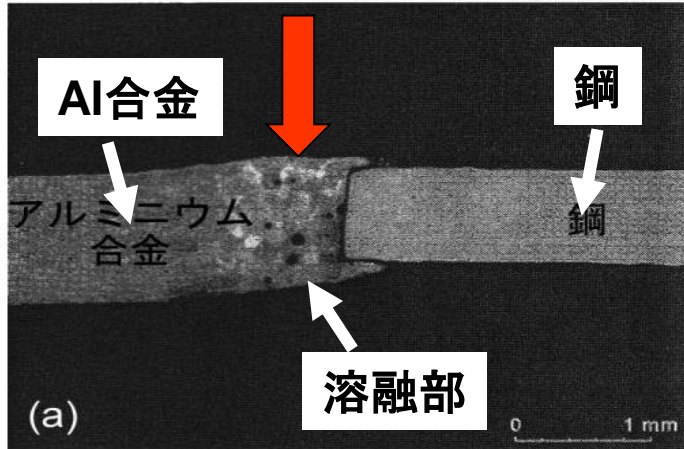
固相接合であるが、融点直下の高温の、真空中で長時間加熱



- ・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）

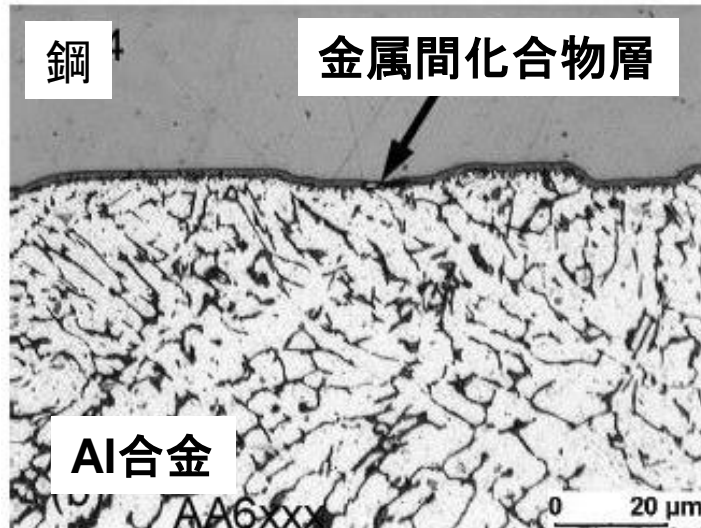
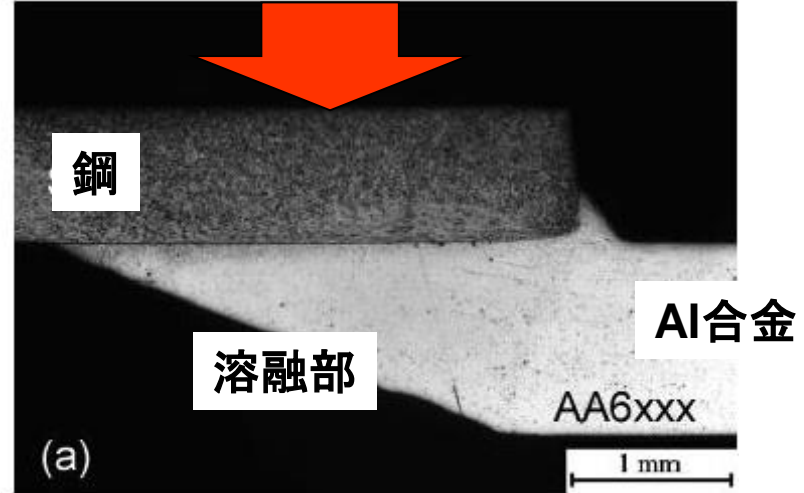
レーザー溶接(ブレージング)の例 (高温反応プロセス)

突合せ継手：レーザー照射位置をAl側とし、Al合金のみ溶融



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合金のみ溶融



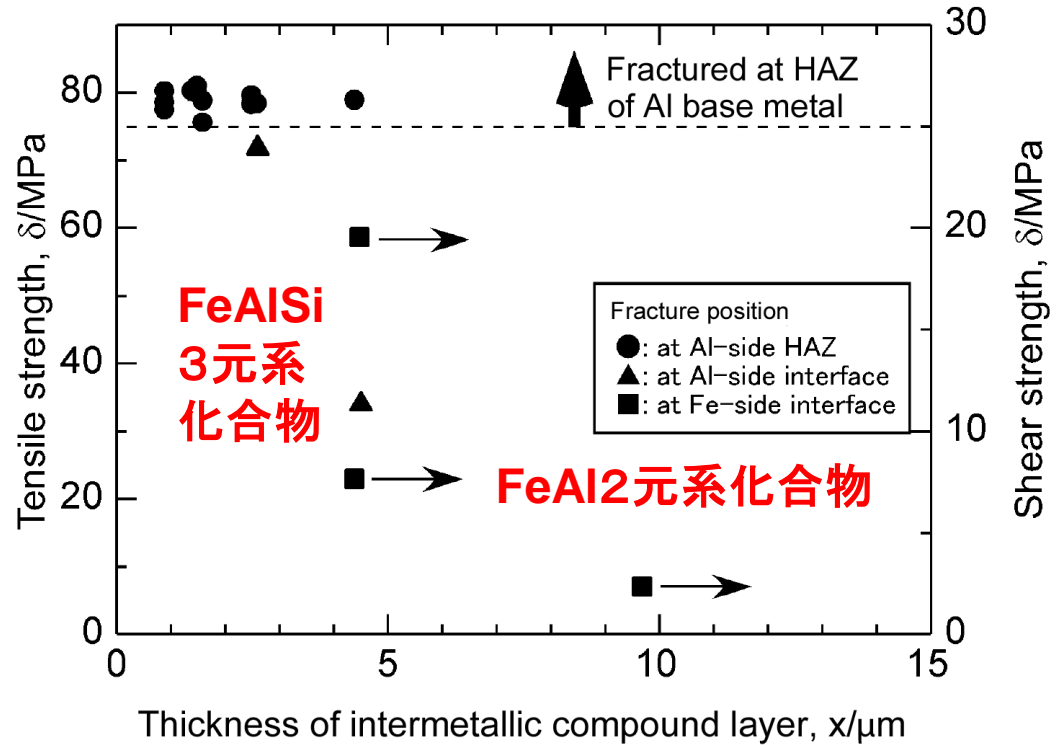
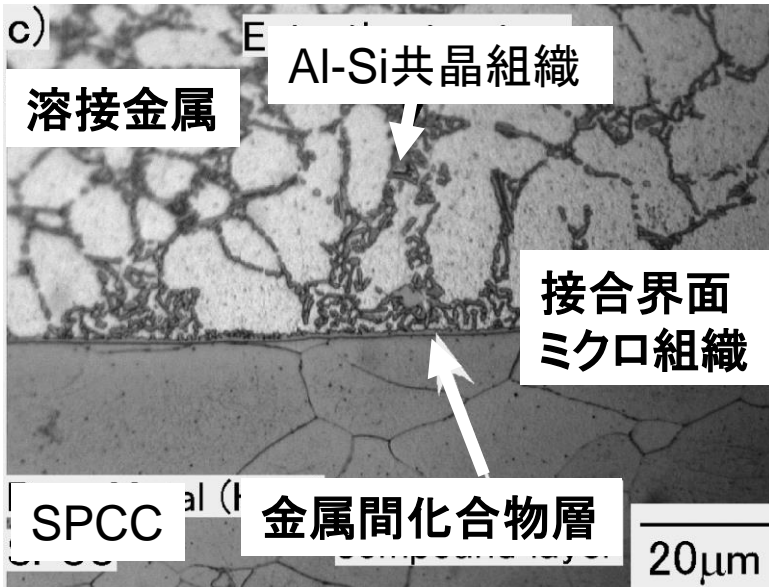
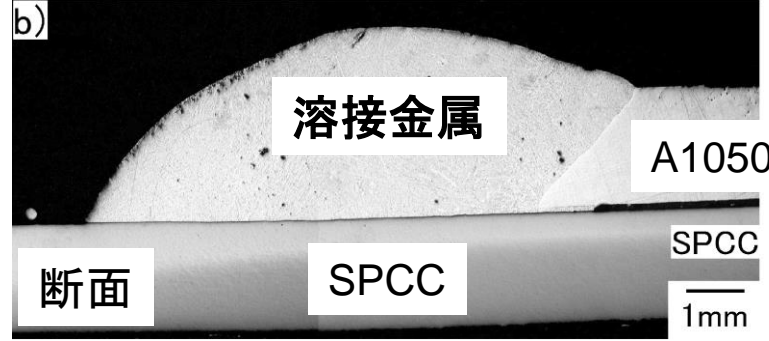
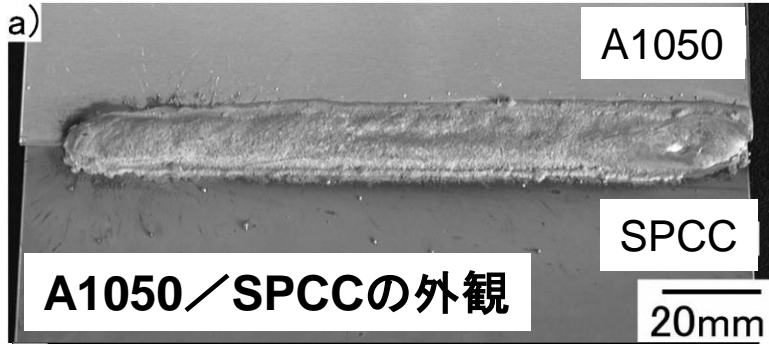
F.Wagner:
ICALEO
2001,
C,1301

Al合金/Steel異材接合継手の断面マクロおよびミクロ組織

ミグアークブレーズ溶接重ね継手(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

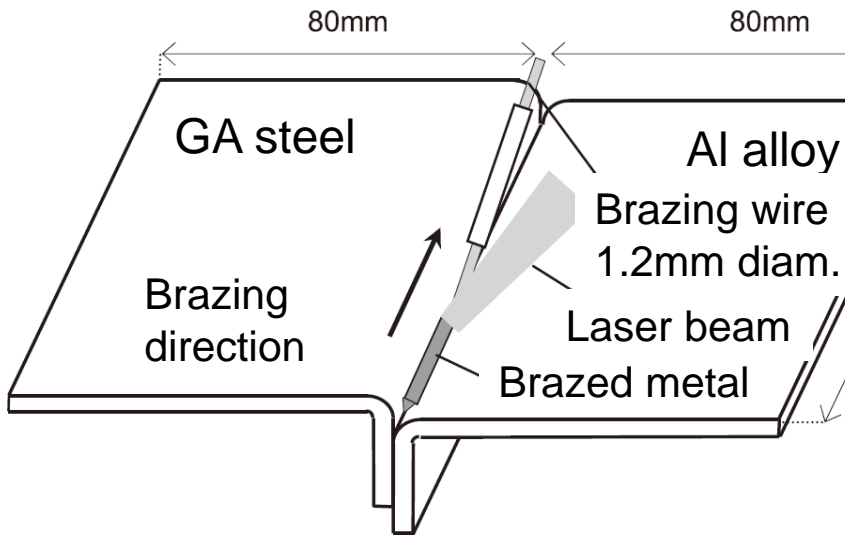
継手: アルミA1050/炭素鋼SPCC
溶加材ワイヤ (フラックス内蔵)
BA4047 (Al-12%Si合金)



1~3 μm 厚さでAl母材破断

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

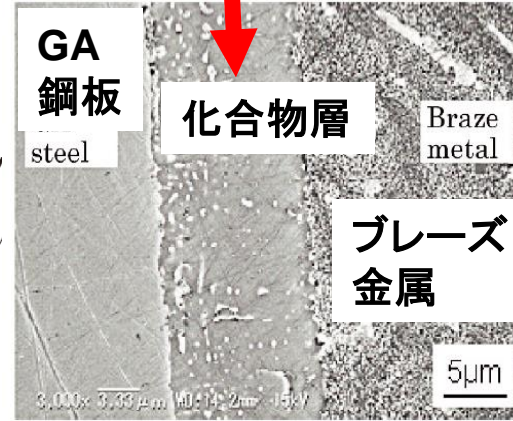
新しいZn-Si合金溶加材を用いたアルミ合金／亜鉛めっき鋼板の異材レーザーブレージング(高温反応プロセス)



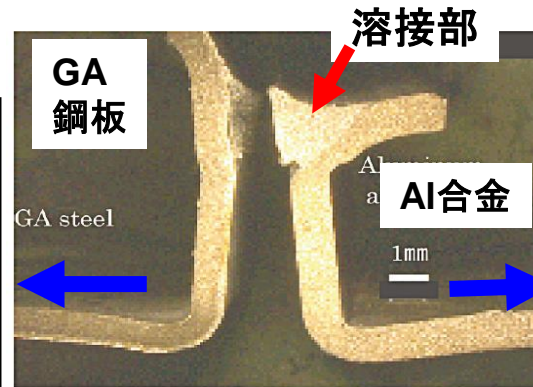
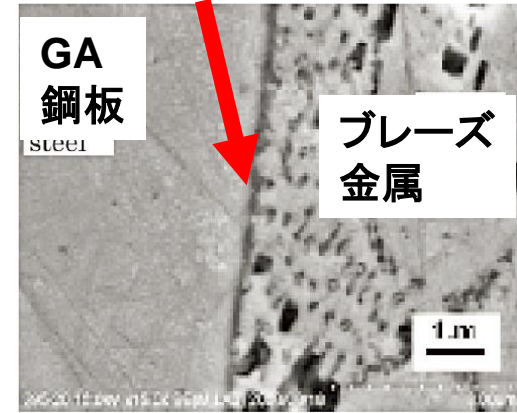
半導体レーザー、フレア継手
GA鋼板／6022Al合金

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

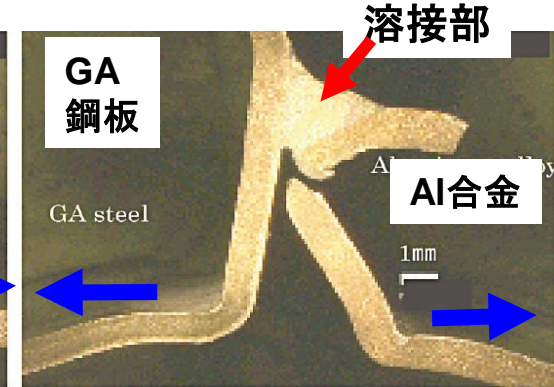
Fe-Al化合物
厚さ10 μ m



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

アルミ合金と鉄鋼の直接異材接合

低温反応プロセス

金属の固相状態での塑性流動現象を利用するプロセス

- 圧接
- 摩擦攪拌接合FSW

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

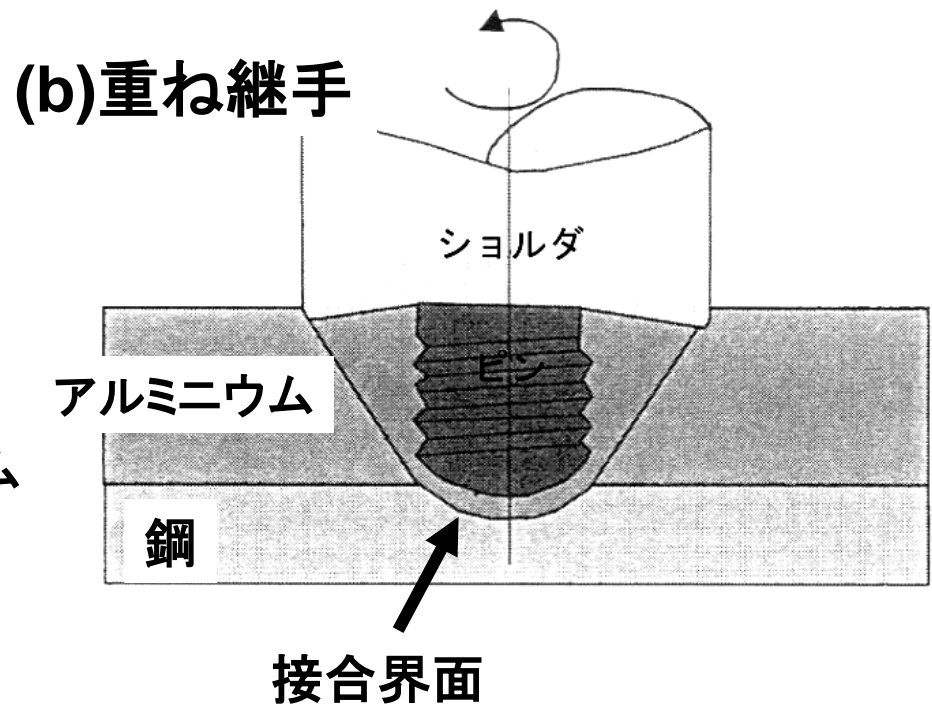
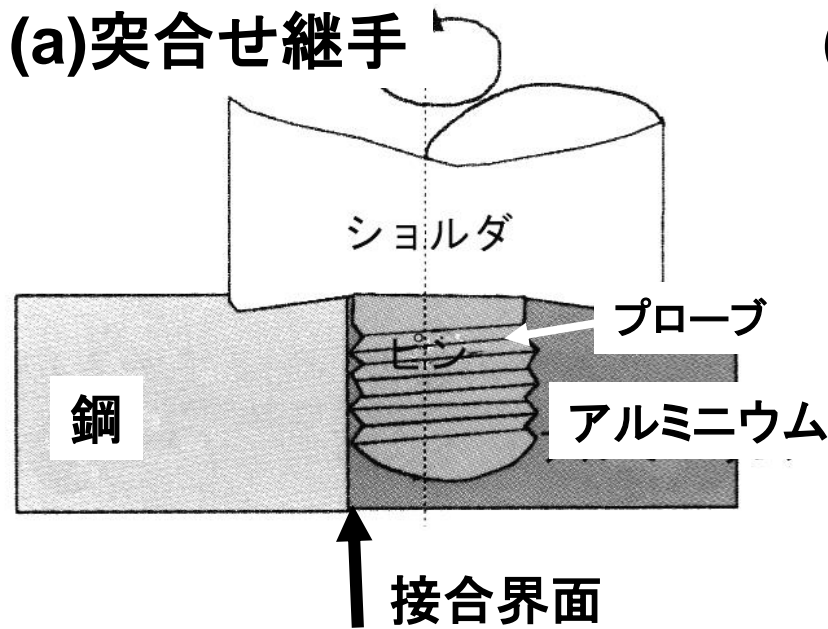


被接合材:アルミ合金板、板厚6mm

FSWによるAl合金／鉄鋼の異種材料接合 (低温反応プロセス)

- 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



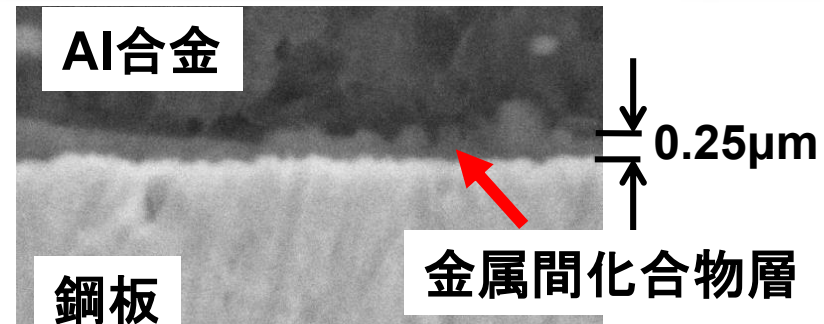
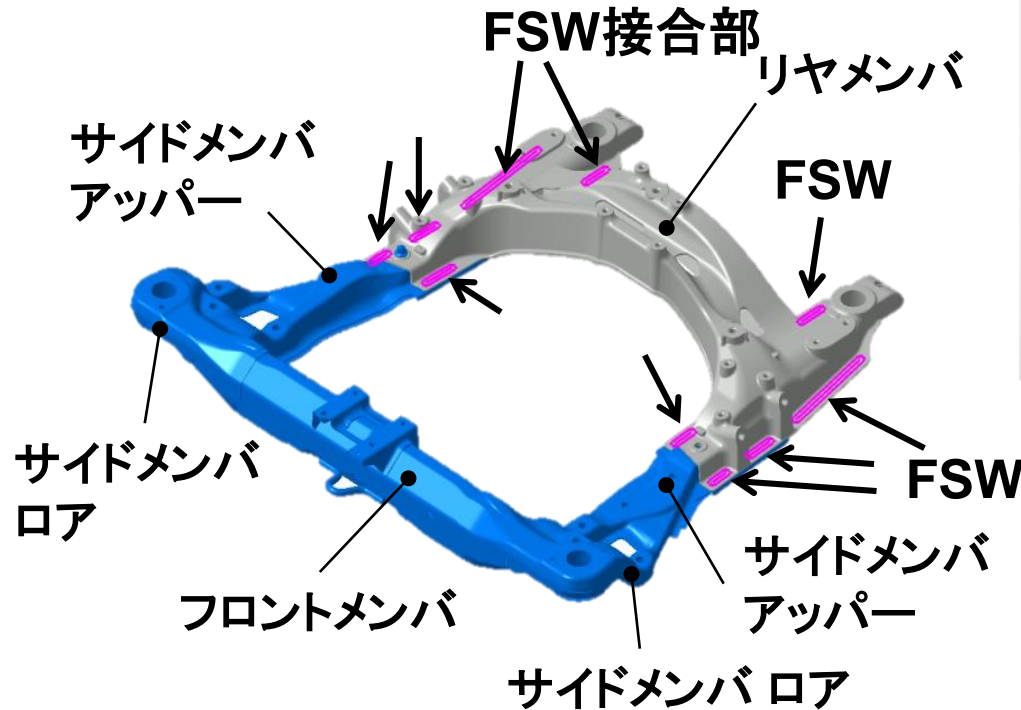
岡村ら：溶接学会誌72(2003)436.

岡村ら：軽金属溶接 42(2004)49.

鋼板とAI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)

第3世代異種材料接合

- 材料構造がまったく異なる材料間の接合

- 金属／高分子（樹脂・CFRP）
- 金属／セラミックス

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 レーザ加熱 超音波加熱 	<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"> 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

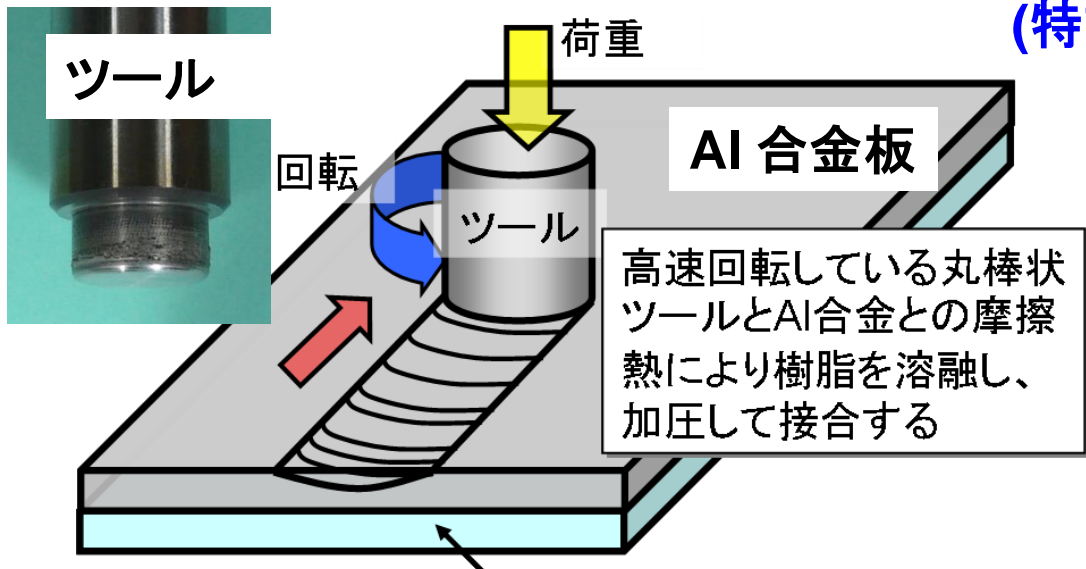
直接接合法：

- ・ 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（レーザーエネルギー利用）
 - ・ 摩擦重ね接合法（摩擦エネルギー利用）

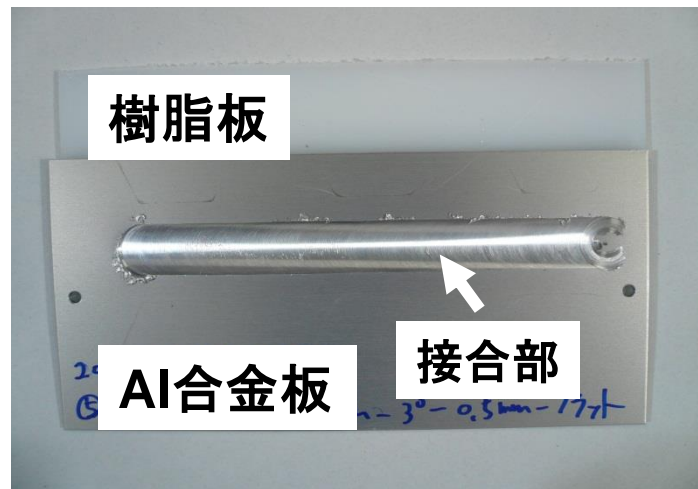
マルチマテリアル化に向けた多様な接合方法の整備が必要：継手形状、特性、量産性、コストなど

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)

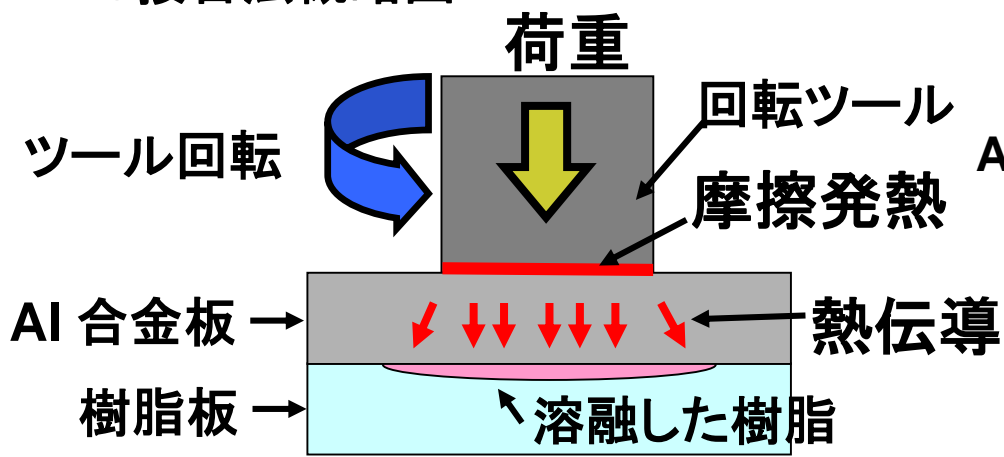
(特許第5817140号、H27.10.9登録)



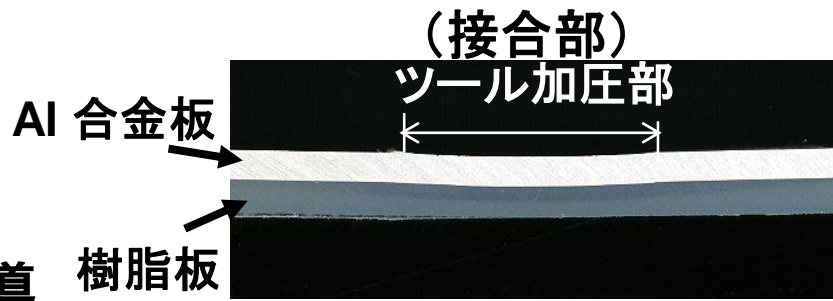
FLJ接合法概略図



接合継手外観



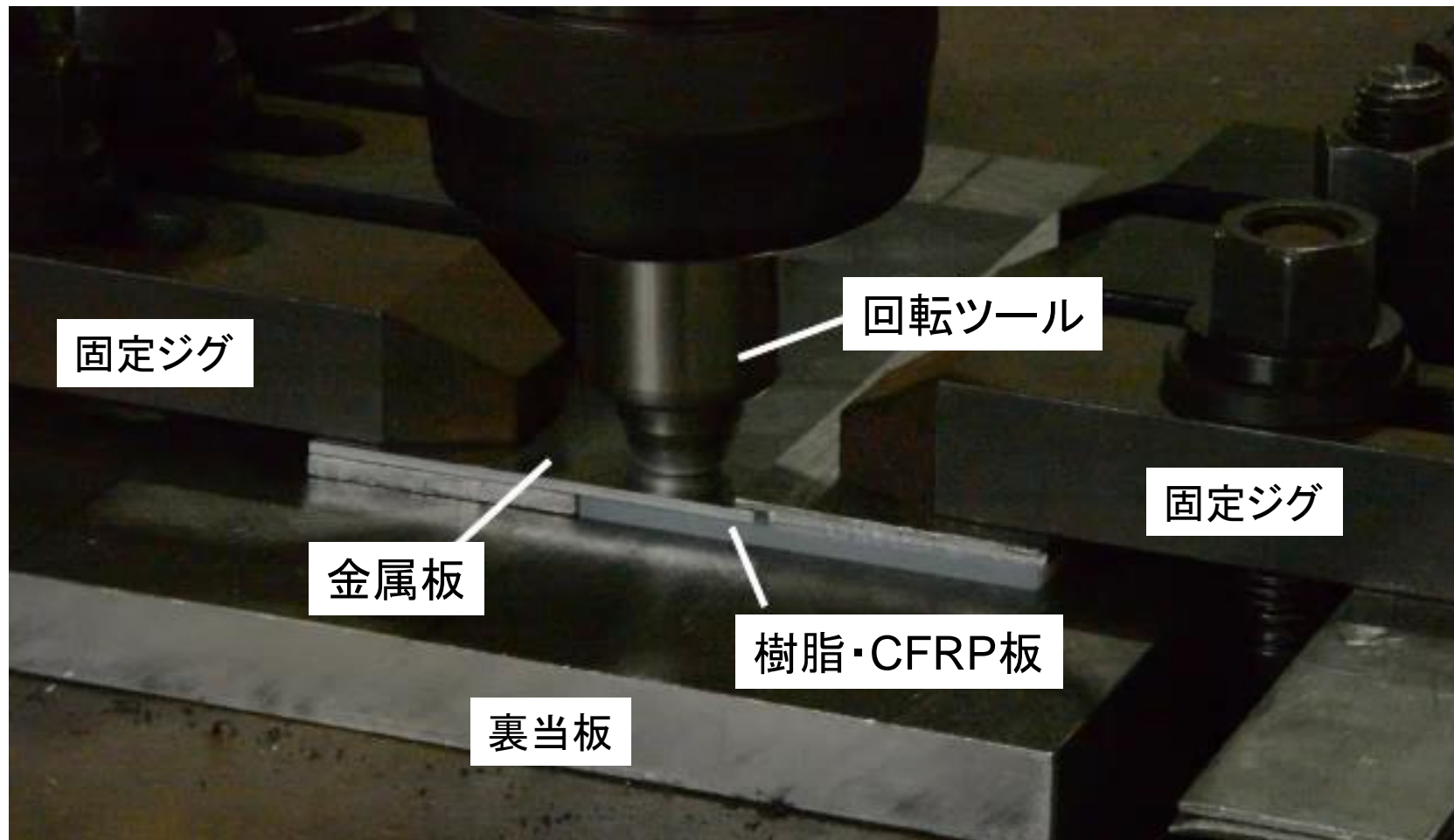
接合機構



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



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

表面処理無しのアルミ合金では
接合不可、アルマイト皮膜材
では接合可能

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

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：

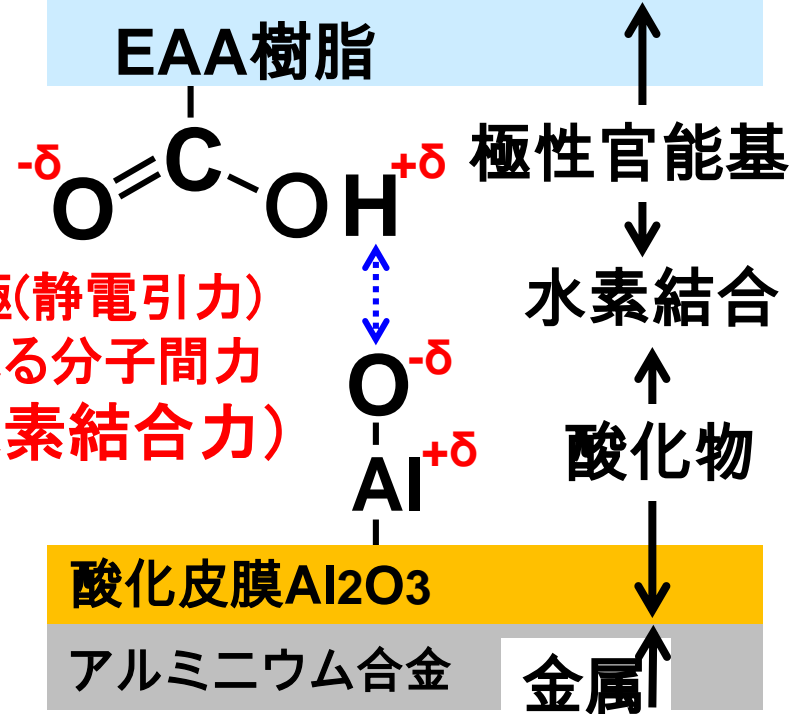
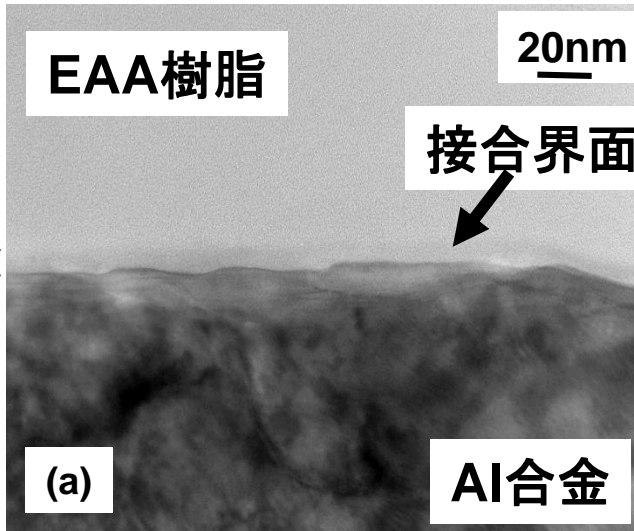
**(1) 分子間力：ファンデルワールス力、
水素結合**

(2) 化学的結合力：共有結合など

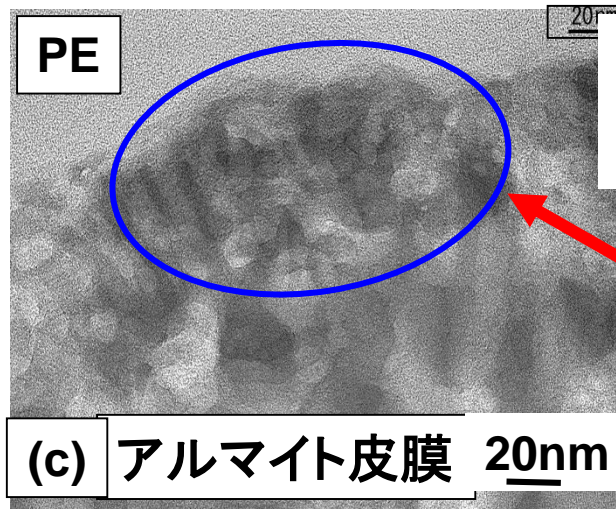
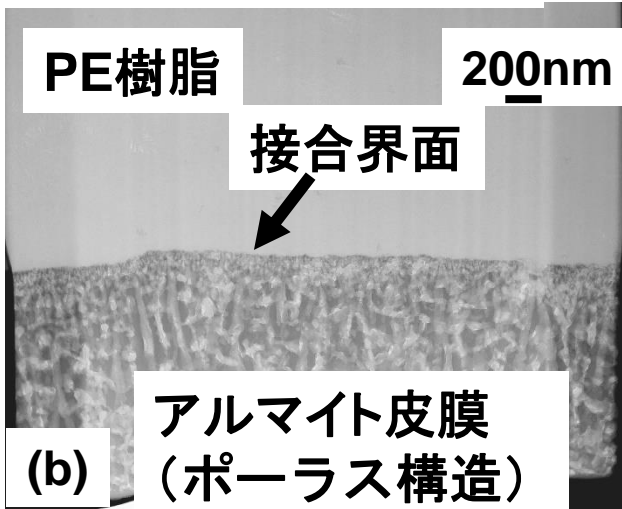
(3) 機械的結合力：アンカー効果

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)



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

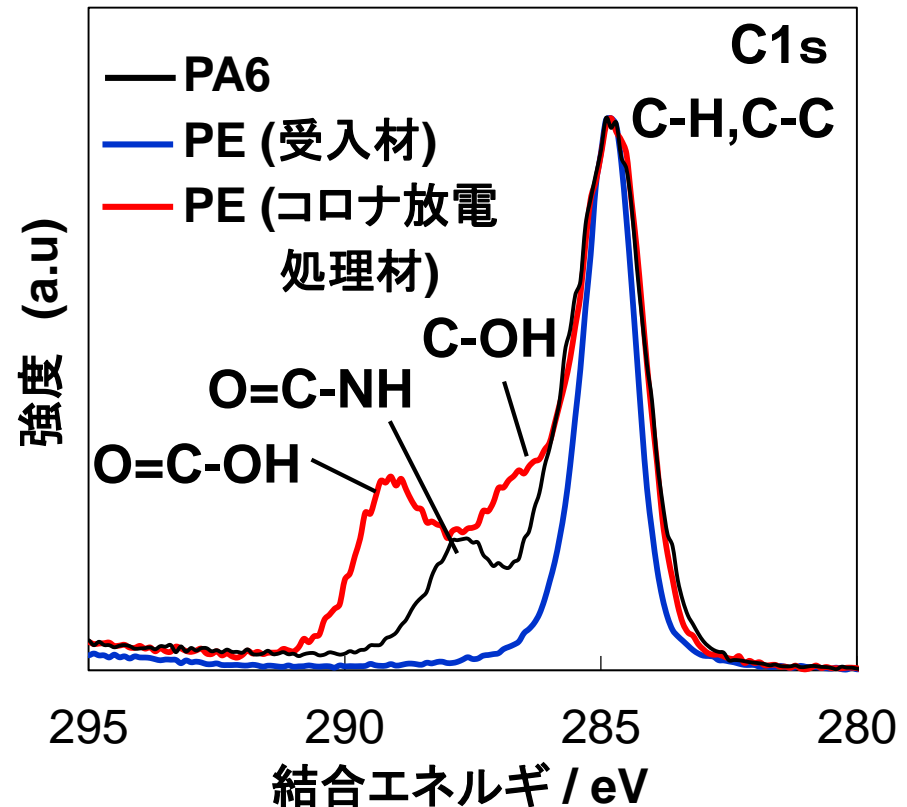
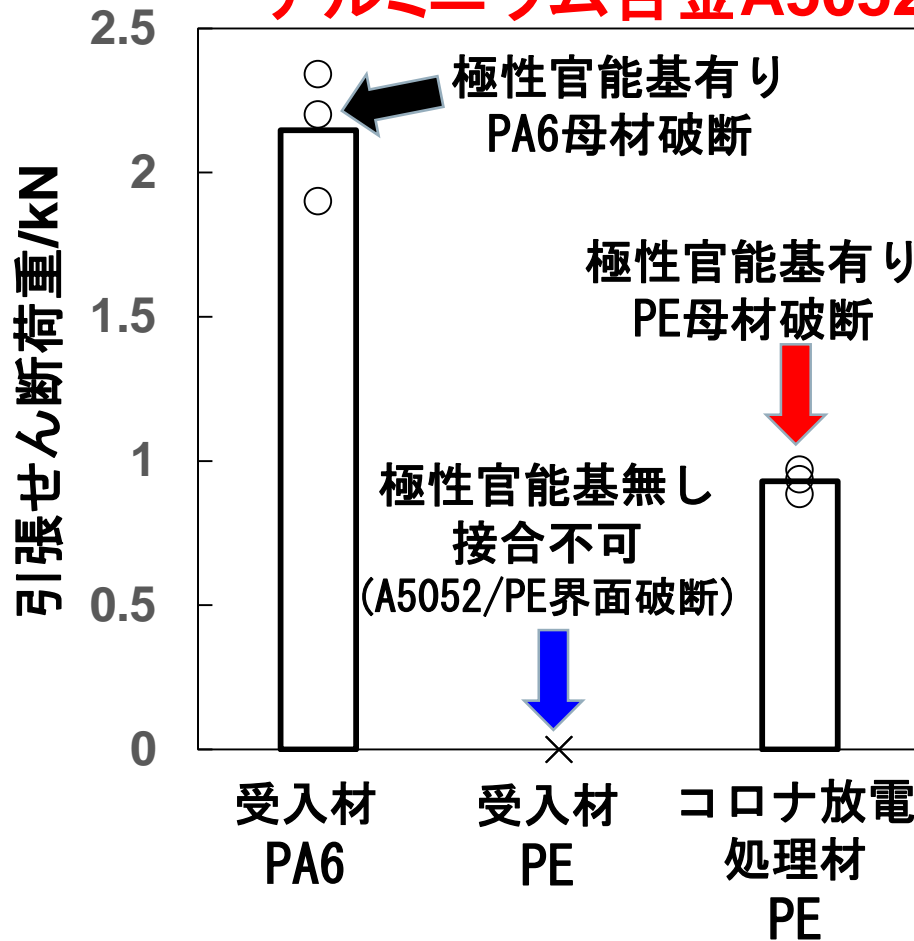
ポア内への
樹脂の侵入

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

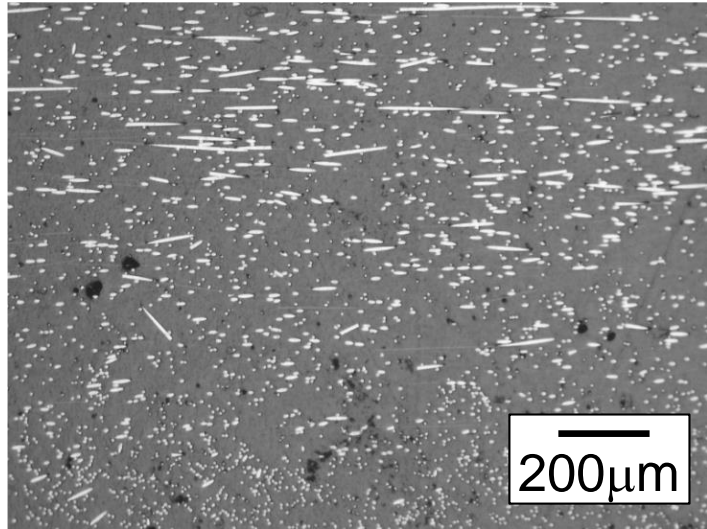
アルミニウム合金A5052 表面研磨処理材



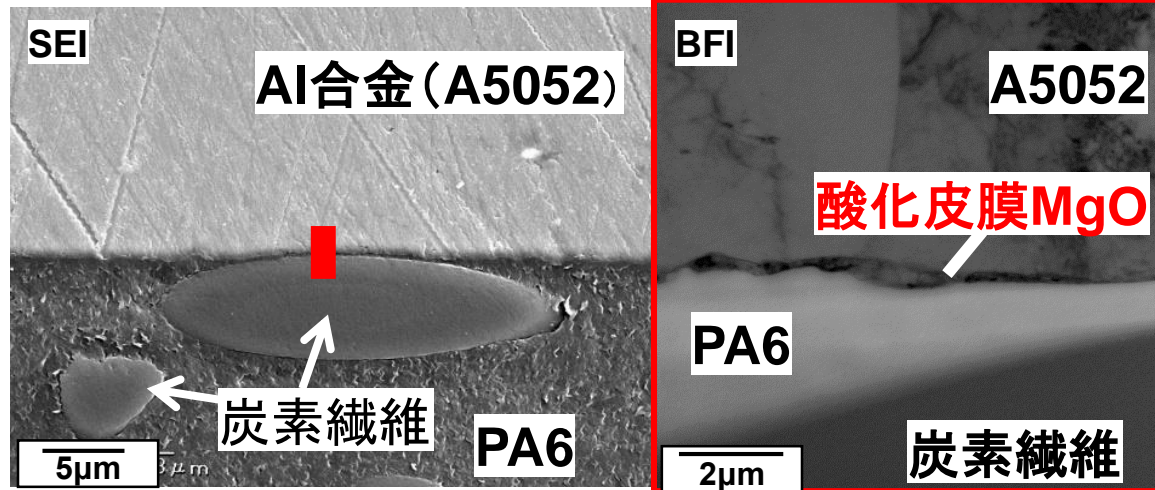
ヒドロキシル基(C-OH)およびカルボキシル基(O=C-OH)による水素結合の効果を示唆

摩擦重ね接合法によるAl合金／熱可塑性CFRPの直接接合

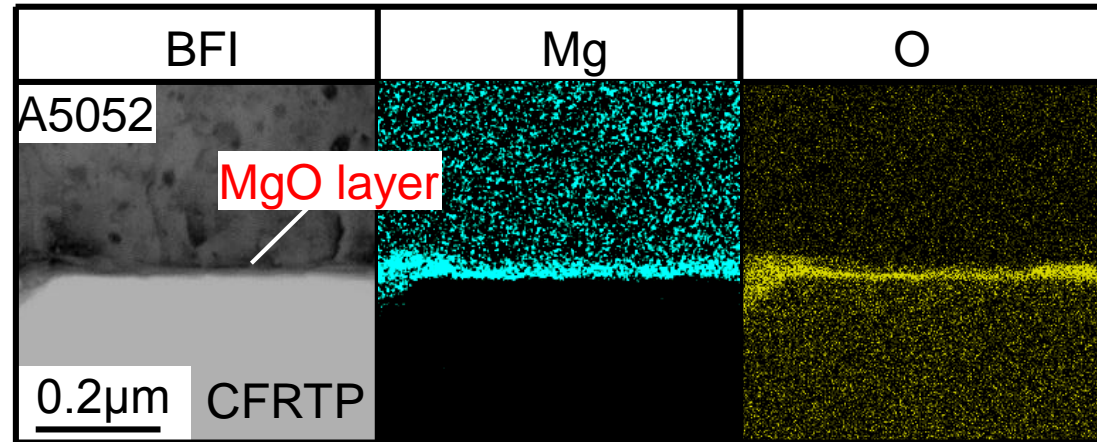
射出成形法による
短繊維CFRP板(3mmt)



接合界面構造



炭素繊維:短繊維
長さ200μm
直径5~10μm
マトリックス:熱可塑性樹脂
PA6



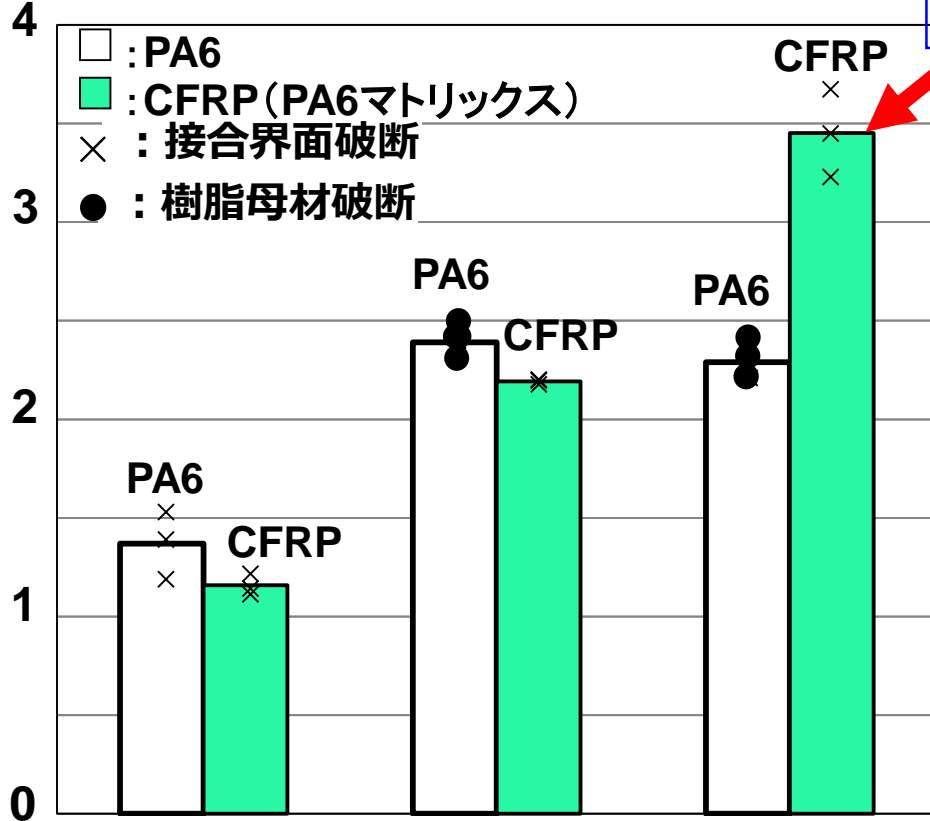
アルミニウム合金表面の酸化皮膜とマトリックス樹脂との間で接合

A5052 / PA6 · CFRP接合継手引張せん断強度 に及ぼす各種表面処理の影響

幅15mmの短冊状試験片を3本試験に供した。

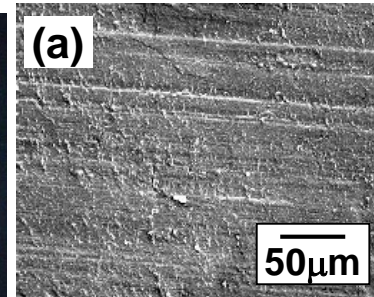
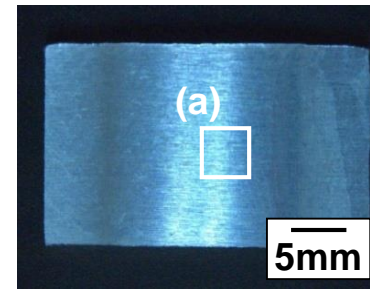
分子間力による接合の限界

引張せん断破断荷重 / kN

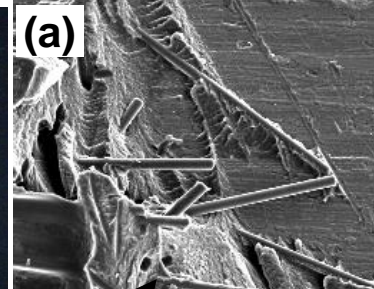
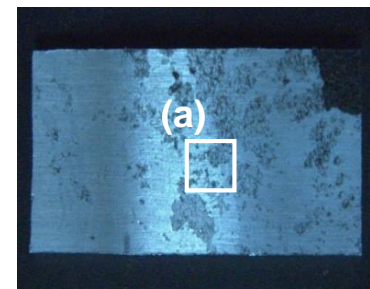


アルミニウム合金側破断面形態

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

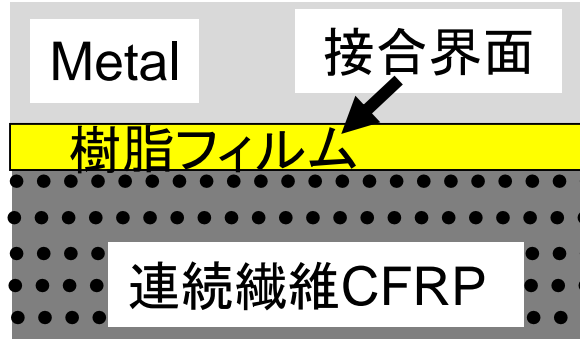
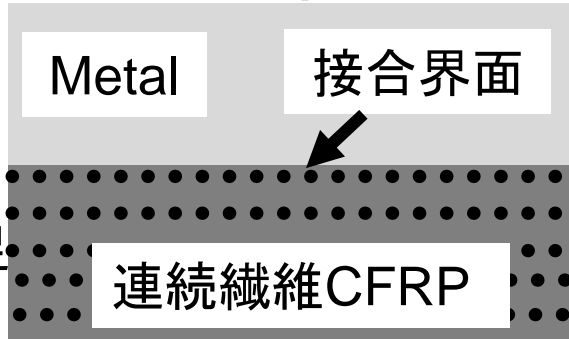
FLJ条件 :

ツール回転数 : 2000rpm

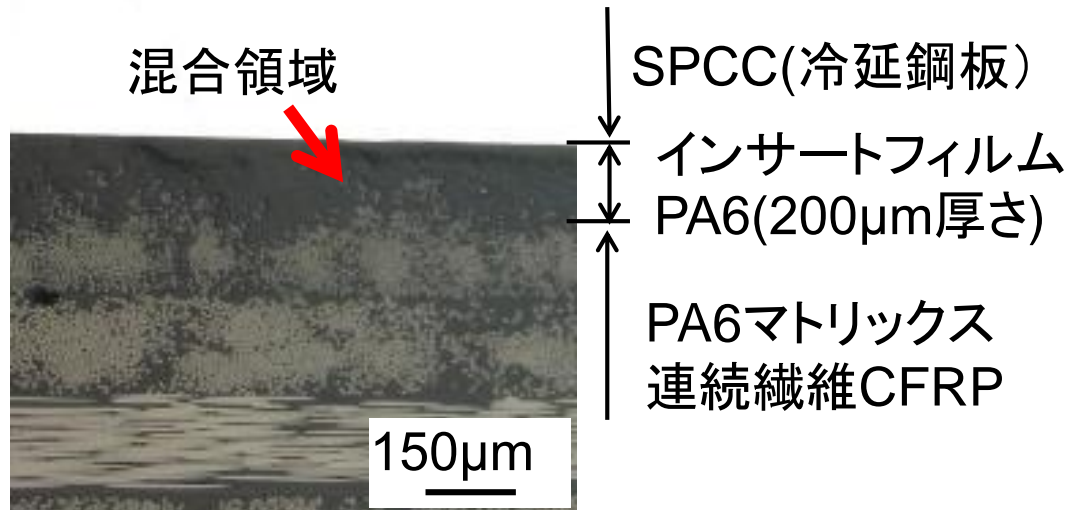
接合速度 : 400mm/min

熱可塑性連続繊維CFRP / SPCCの インサート樹脂フィルムを用いた直接接合

(a) インサート
フィルム無し:
マトリックス
樹脂量が不足
して接合困難



(b) インサート
フィルム有り:
十分な樹脂量を
接合界面に供給
して接合可能



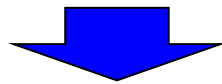
(中田ら、未発表)

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

高強度インサート樹脂材と接合界面結合力の強化により連続繊維CFRPと金属との直接接合が可能となり、継手引張せん断試験では連続繊維CFRP(熱可塑・熱硬化)の層間剥離を呈する良好な継手が得られる

分子間力である水素結合から、
より強い結合力である化学結合へ

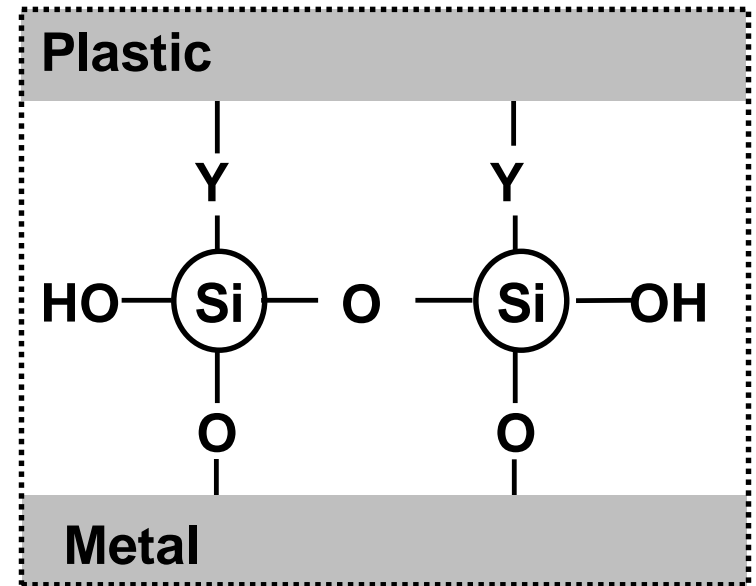
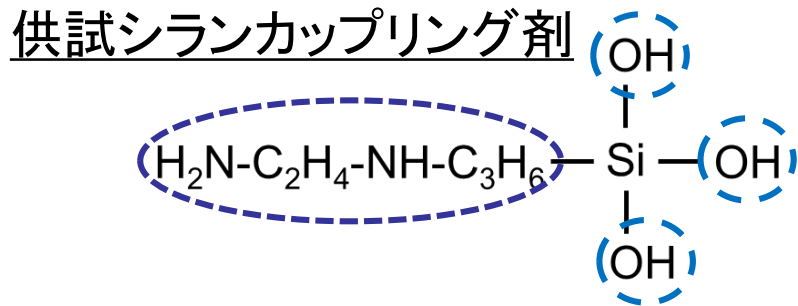
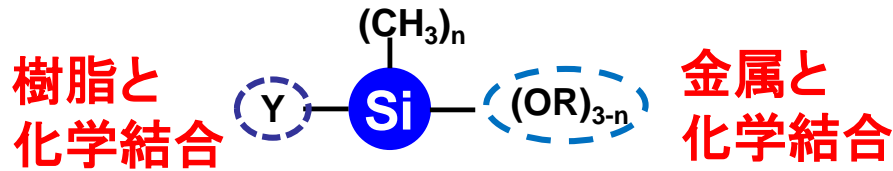
いかに、樹脂と金属との間で
化学反応を起こすか！



シランカップリング処理による
化学結合の導入

より強い結合力:水素結合から**化学結合**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

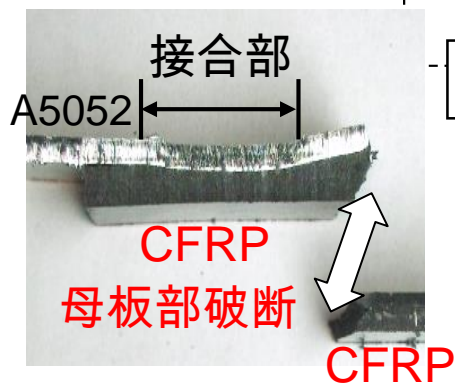
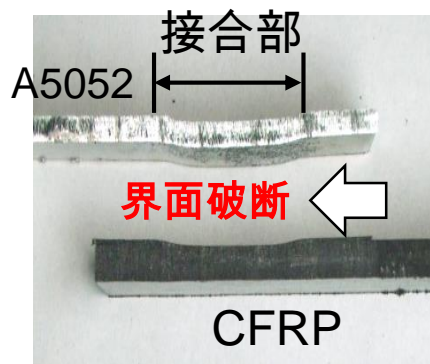
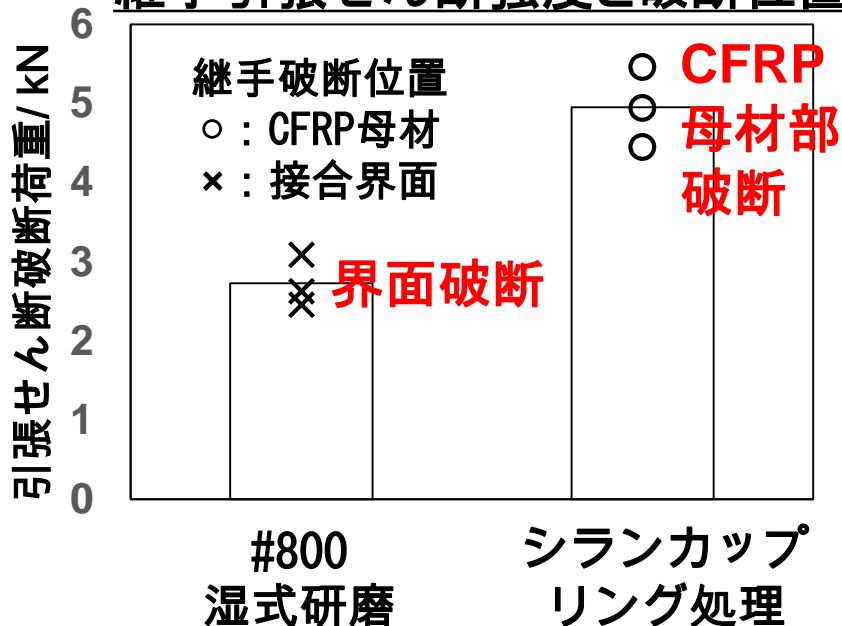


金属表面へのシランカップリング処理:アルミニウム合金、鉄鋼

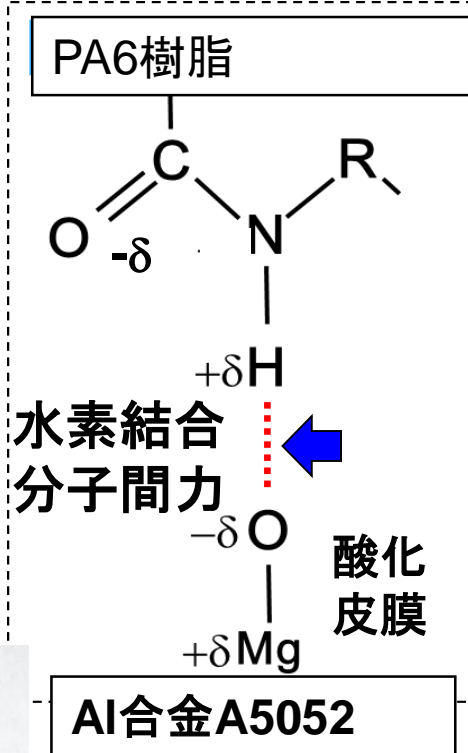
- #800研磨紙を用い、水中で金属板表面を研磨
- シランカップリング水溶液に金属板を浸漬
- 乾燥炉内で乾燥
- 常温にて冷却
- それぞれの最適条件において摩擦重ね接合により接合を実施

AI合金A5052と熱可塑性短繊維CFRPとの接合強度に及ぼすAI合金表面へのシランカップリング処理の効果

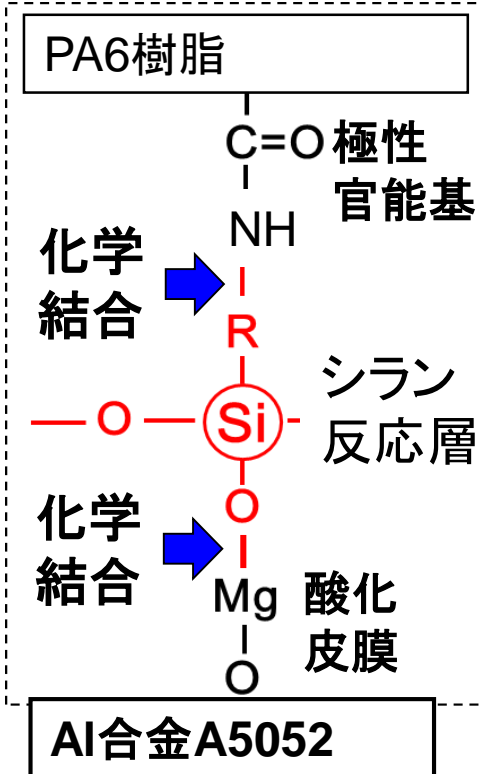
継手引張せん断強度と破断位置



湿式研磨処理



シランカップリング処理



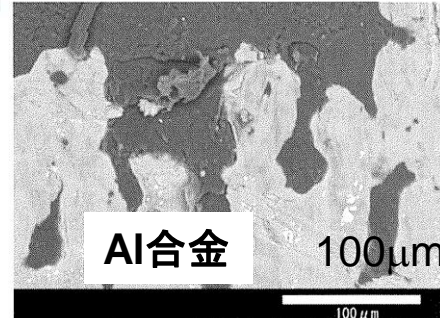
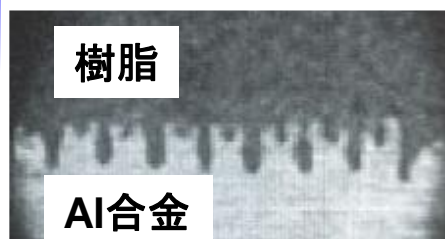
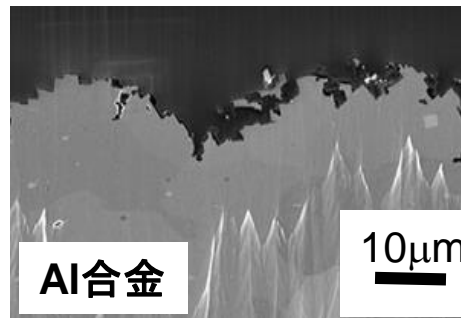
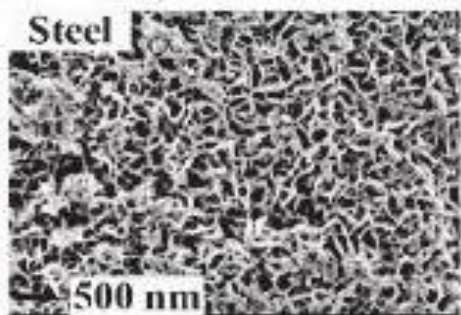
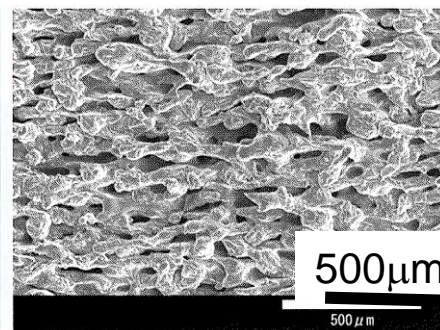
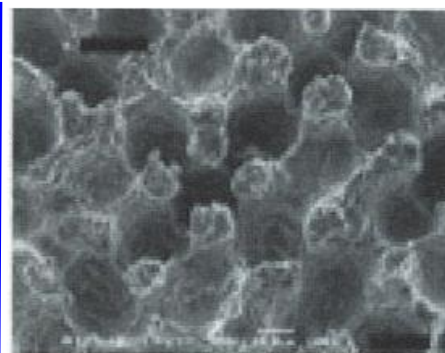
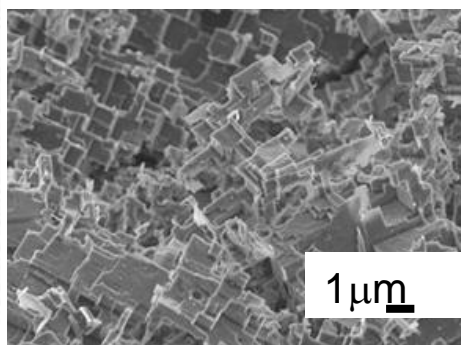
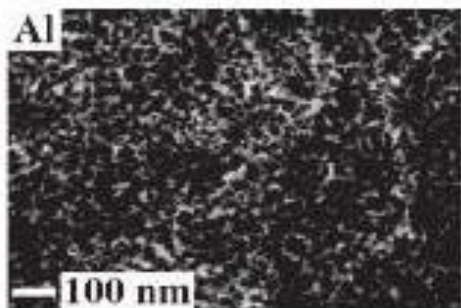
シラン処理により水素結合(分子間力)から化学結合(共有結合)に変化し、接合界面強度が増加する

シラン処理により接合界面破断から短繊維CFRPの母板部破断に移行

より強い結合力：
金属表面のアンカー作用を利用した
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接合

アンカー効果に有効な注目される金属表面処理



(a)NMT処理後の
金属表面形態
(数十nm深さ凹凸)
(大成プラス(株))

(b)アマルファ処理後
の表面形態と断面
(数十μm深さ凹凸)
(メック(株))

(c)レザリッジ処理後
の表面形態と断面
(数十μm深さ凹凸)
(ヤマセ電気(株))

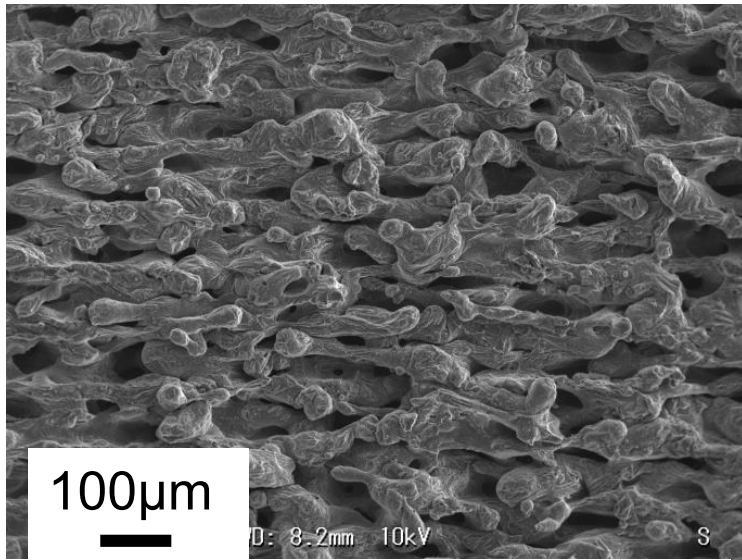
(d)DLAMP処理後の
表面形態と断面
(~100μm深さ凹凸)
(ダイセルポリマー(株))

化成処理による微細凹凸形成

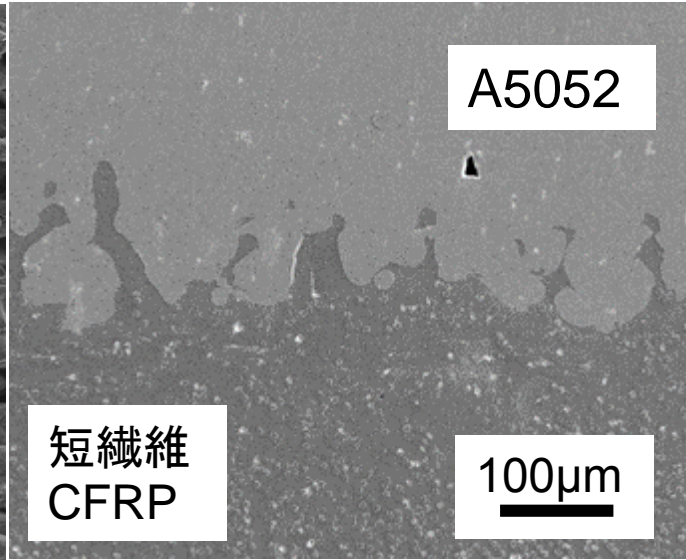
レーザー処理による微細凹凸形成

金型を用いる射出成形による金属と樹脂のインサート成形に実用化

AI合金A5052板と熱可塑性短繊維CFRP板との直接接合

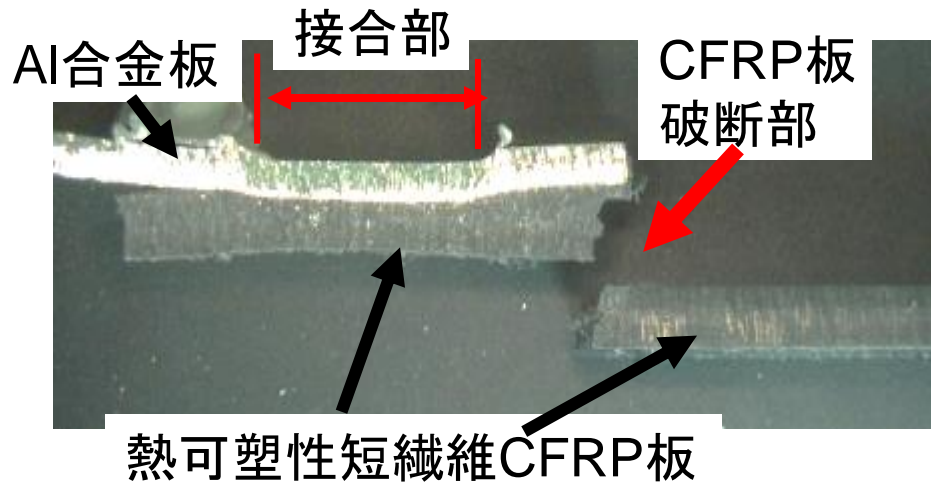


(a) AI合金のDLAMP処理表面



(b)接合界面のマイクロ組織

DLAMP処理:
レーザ照射による数十～数百μmレベルの溝深さと複雑凹凸形状



(c) 摩擦重ね接合継手の引張せん断試験におけるCFRP板破断状況

DLAMP処理はダイセルポリマー(株)のご好意による

**接合界面破断ではなく
CFRP母板部で破断**

まとめ

異種材料接合に関して、接着剤や機械的締結法に依らない直接接合法に注目して、その接合技術の現状について取り纏めを行った。

1. 金属材料同士の異材接合

硬くて脆い金属間化合物を形成する異材の組合せは直接接合は困難であるが、接合界面の金属間化合物層の厚さを極力薄くすることで接合継手の形成が可能となる。

2. 金属材料と樹脂・CFRPとの異材接合

直接接合に必要な樹脂特性として熱可塑性と極性官能基が挙げられ、接合機構として強い分子間力である水素結合が基本的に作用しており、さらなる接合強度の改善のためには金属表面のシランカップリング処理などによる化学結合の導入やエッチングやレーザ処理などの金属表面の粗面化処理によるアンカー効果の導入が効果的である。

実用化にあたっては、異材継手の接合品質評価、各種機械的・化学的性能評価、市場性評価などが必要である。

ご清聴有難うございました！

講演参考資料：

- ・ 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.
- ・ 中田一博：「アルミニウムと樹脂・CFRPとの熱圧着機構」軽金属溶接、59(2021)No.3,81-89.

連絡先：中田一博

nakata@jwri.osaka-u.ac.jp

ホームページ <http://www.nakata-wjs.info/>