異種材料接合の現状と課題

大阪大学　名誉教授
大阪大学　接合科学研究所　特任教授

中田　一博

「異種材料接合技術の最前線」
公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構
２０１７年８月２４日

講　演　内　容

1. 異材接合の目的
2. 異材接合技術への期待
3. 金属材料における異材接合の可能性
4. 第2世代異種材料接合
   - アルミニウム／鉄の異材接合の現状
     溶融溶接、ブレーズ溶接、固相接合(FSW等）
   - その他の異材接合組み合わせ例
5. 第3世代異種材料接合
   - 金属／樹脂・CFRPの異材接合

現状と課題の俯瞰

異種材料接合の目的:

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

マルチマテリアル化

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、生体材料、半導体)

↓

異種材料接合技術

代表的な構造用金属材料とその機能

材料機能	構造用金属材料
軽量性	ハイテン鋼、アルミ合金、マグネ合金、チタン合金、（樹脂、CFRP）
耐熱性	ニッケル基合金、チタン合金、CrMo鋼
耐低温性(靭性)	アルミ合金、ステンレス鋼、インバー合金
耐食性	チタン、ステンレス鋼、銅合金、タンタル
熱伝導性	アルミ合金、銅
電気伝導性	アルミ合金、銅

（中田作成）

自動車の軽量化：燃費と排ガス対策

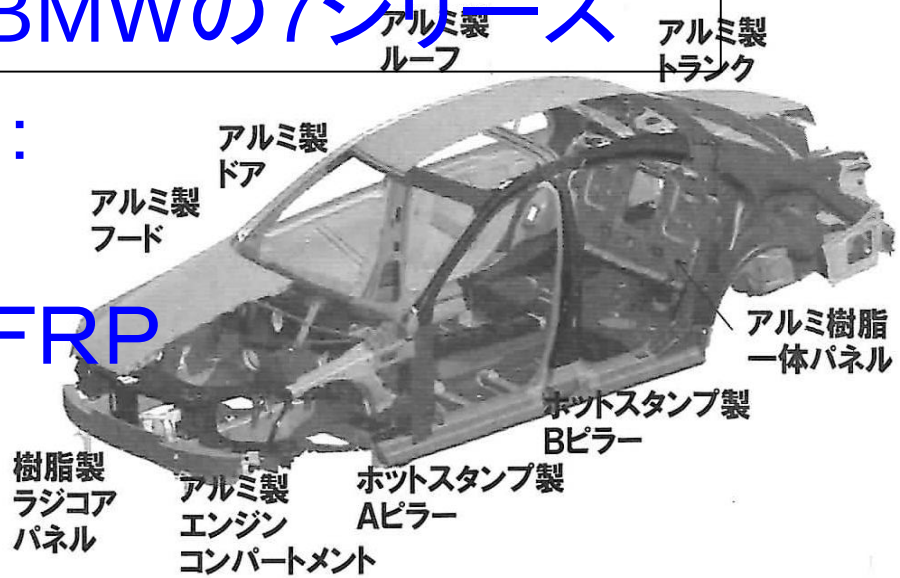
上部構造：車体（ボディー）：

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



ベンツS-Class車体:Euro Car Body 2013

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

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

（中田作成）

溶接・接合法の分類と種類

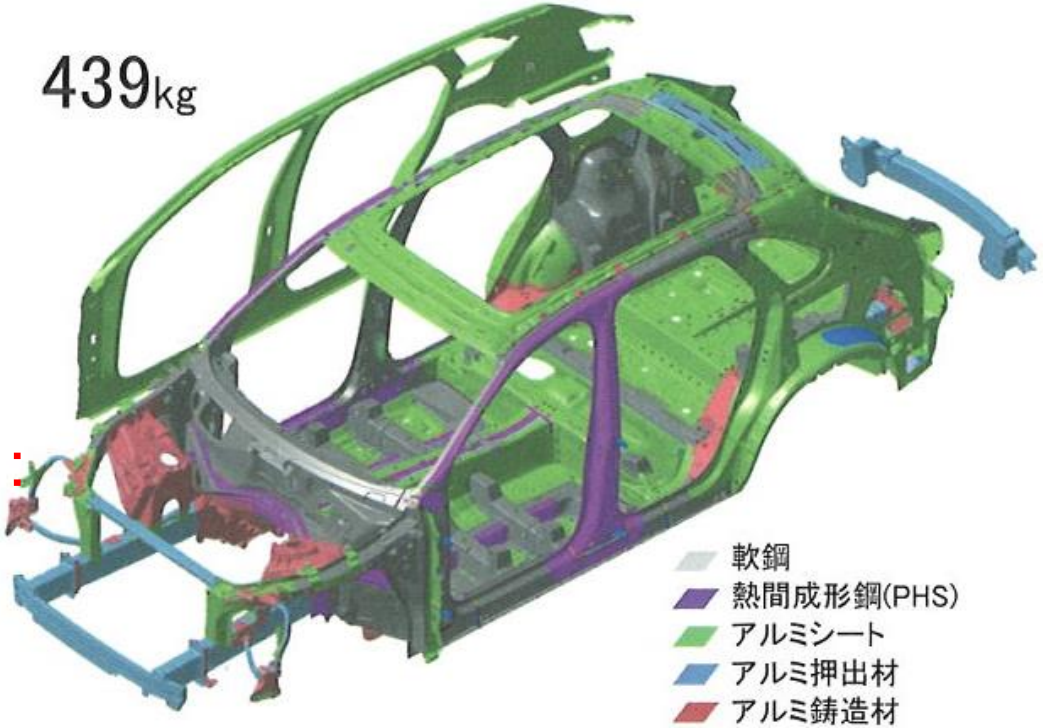
- 溶接・接合
  - 溶融溶接
    - アーク溶接
      - ティグ溶接
      - ミグ・マグ溶接
      - プラズマアーク溶接
    - 抵抗溶接
      - スポット溶接
      - シーム溶接
      - プロジェクション溶接
      - フラッシュバット溶接
    - 高エネルギービーム溶接
      - レーザビーム溶接
      - 電子ビーム溶接
  - 固相接合
    - 拡散接合
    - 摩擦圧接
    - 摩擦撹拌接合（FSW）
    - 爆発圧接
    - 超音波圧接
    - 熱間・冷間圧接
  - ろう接
  - 接着
  - 機械的接合（かしめ、リベット、ボルト）

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

ホワイトボディーのアルミ／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%



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
- 摩擦撹拌接合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

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
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	◎	◎	◎*	×
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）

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	◎	◎
鋳造材	○	◎
高圧鋳造(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

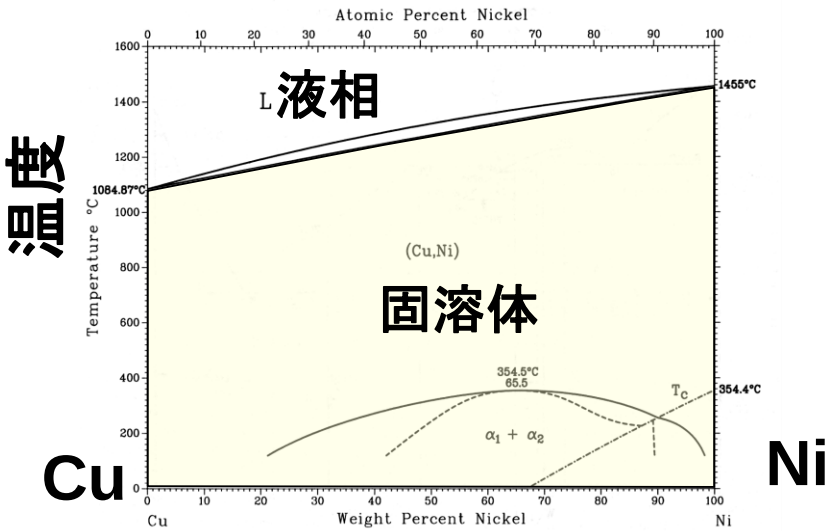
(中田作成)

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

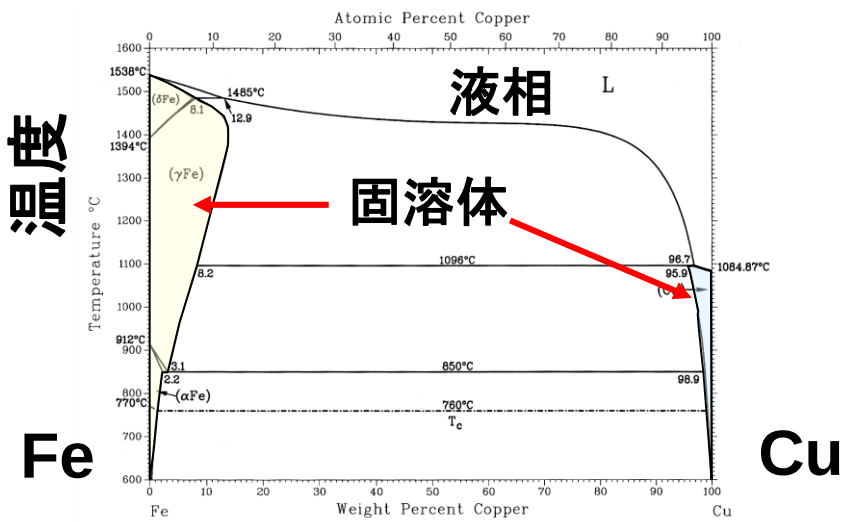
金属材料における異種材料接合の可能性

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

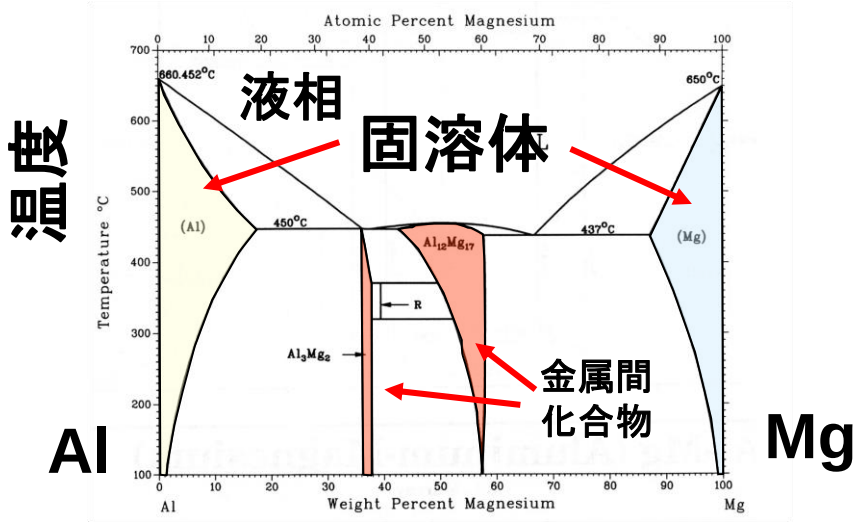
接合界面組織が固溶体か、金属間化合物かで接合性が決まる



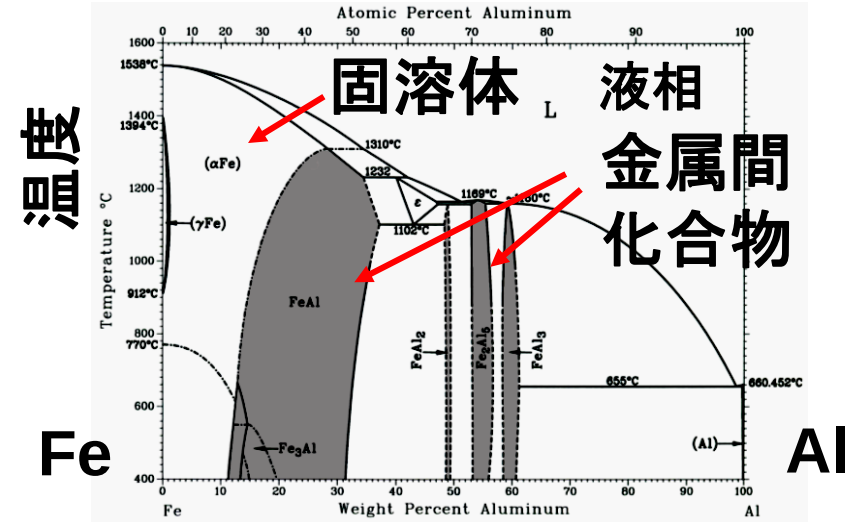
(a) 全率固溶体　Cu−Ni



(b) 2相分離　Fe−Cu



(c) 一部固溶体＋金属間化合物　Al−Mg



(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
- 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）

・異なる種類の金属とその合金間の
　異種材料接合

・金属の種類の組合せにより
　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極めて困難な組合せ

↓

古くから開発研究が継続されてきた

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

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。

日経ものづくり2016.6月号より

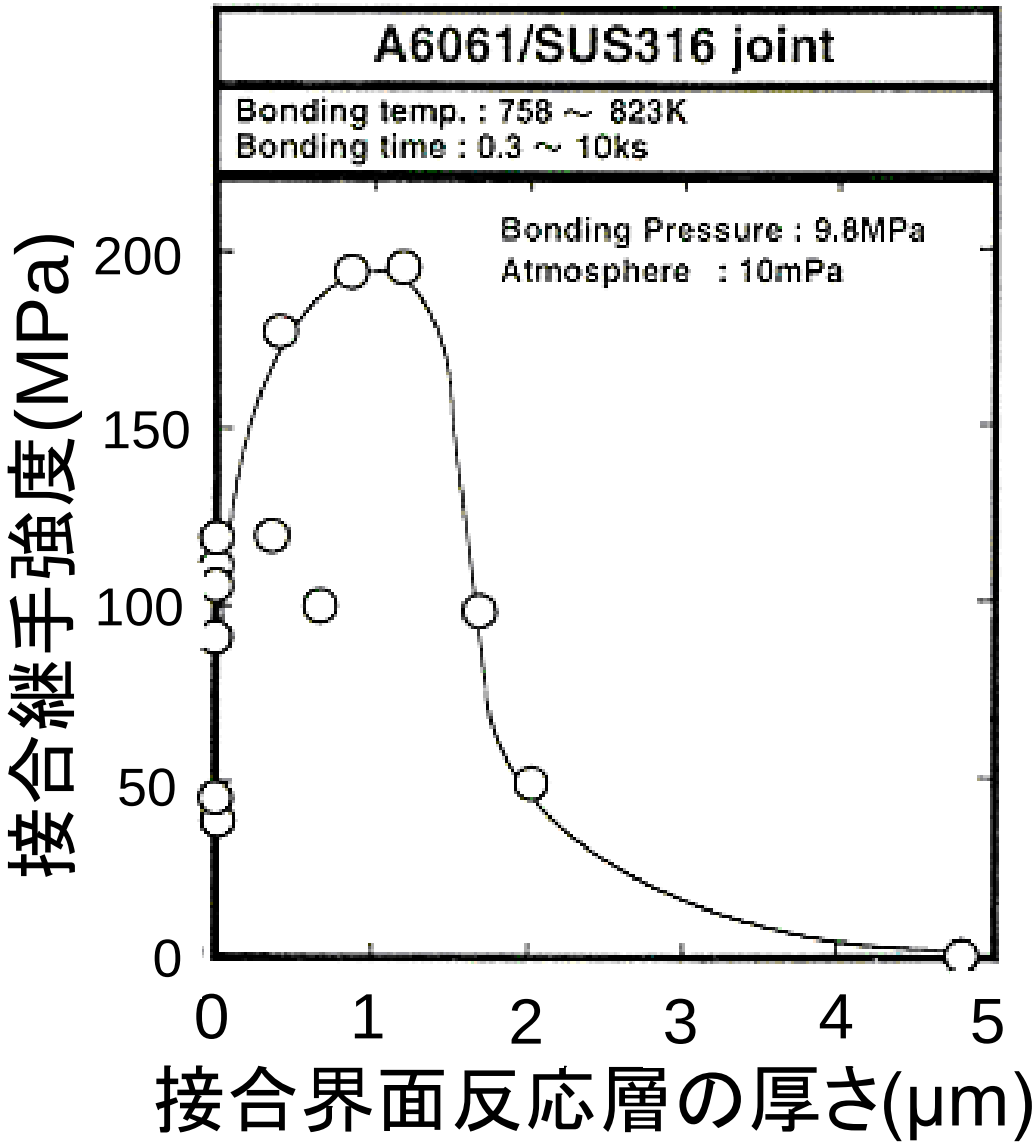
Al / Fe異材接合プロセスと、直接接合が可能な接合界面構造（過去の文献等からの取り纏め結果）

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	・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（1μm）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	・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

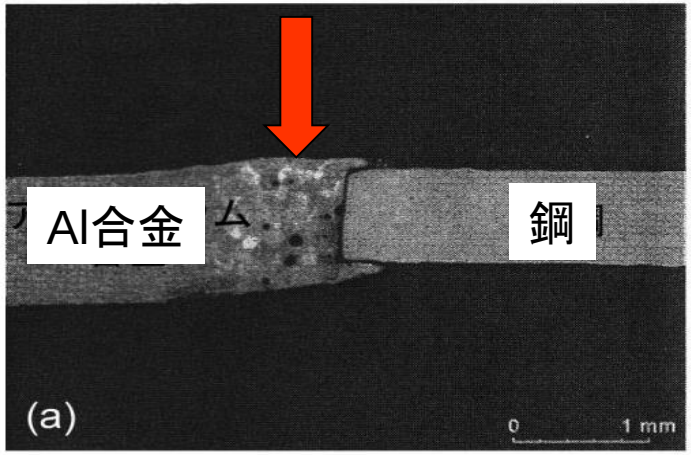


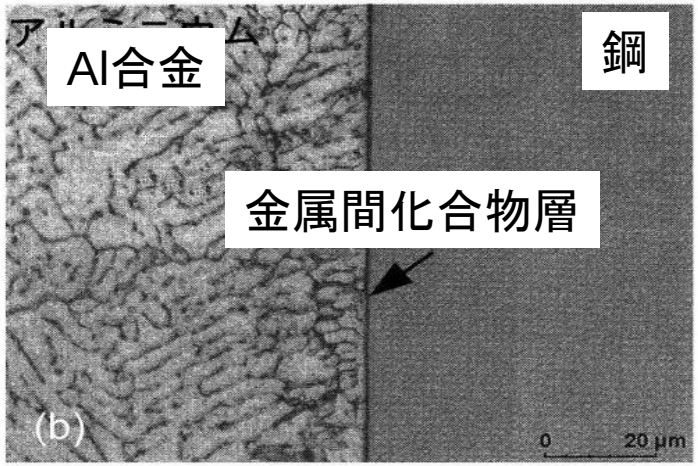
- 金属間化合物層形成
- 金属間化合物層厚さが継手強度の支配因子
- 金属間化合物層厚さ1～2μmで最高強度
- これより薄いと低下（接触部が不均一）
- これより厚いと低下（金属間化合物層内破断）

黒田ら；溶接学会論文集，17(1999),484

レーザ溶接の例（高温反応プロセス）

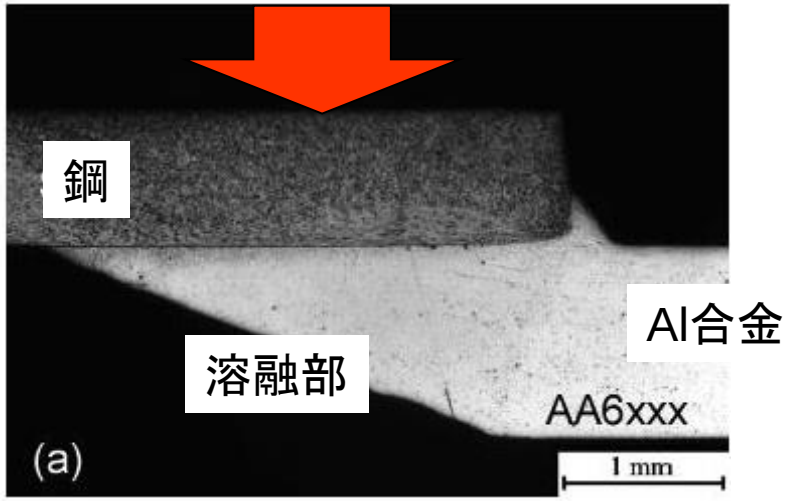
突合せ継手：レーザ照射置をAl側としAlのみ溶融

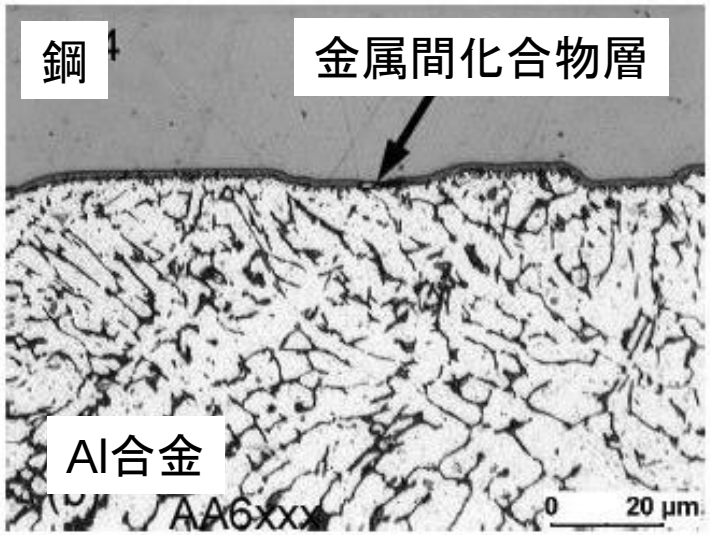




M.Kreimeyer:Schw. & Schen 2002,DVS220,256.

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



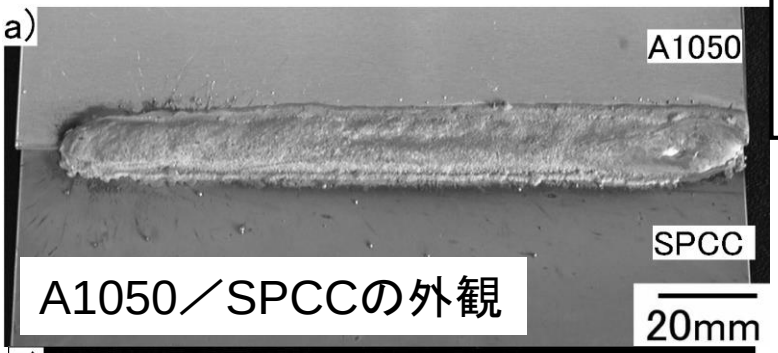


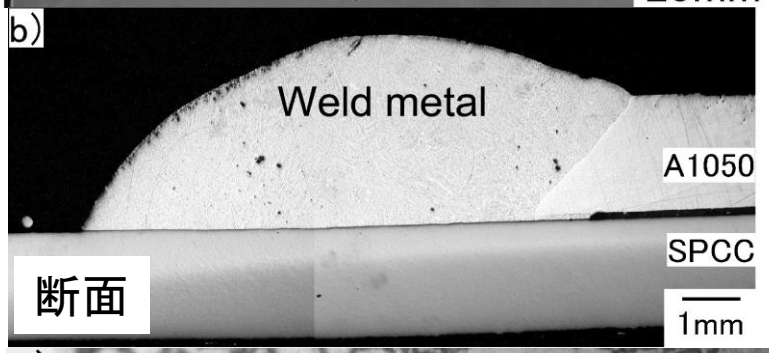
F.Wagner: ICALEO 2001, C,1301

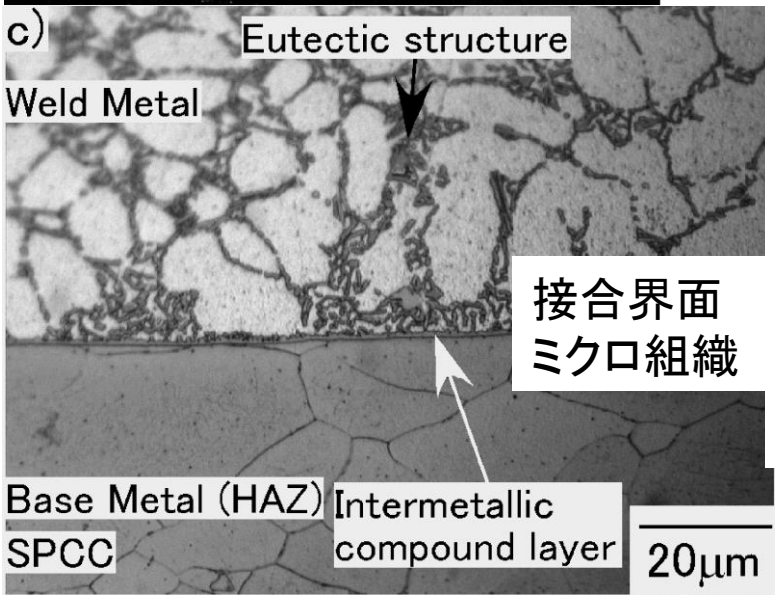
Al合金/Steel異材接合継手の断面マクロおよびミクロ組織

ミグアークブレーズ溶接重ね継手(ろう接の一種)

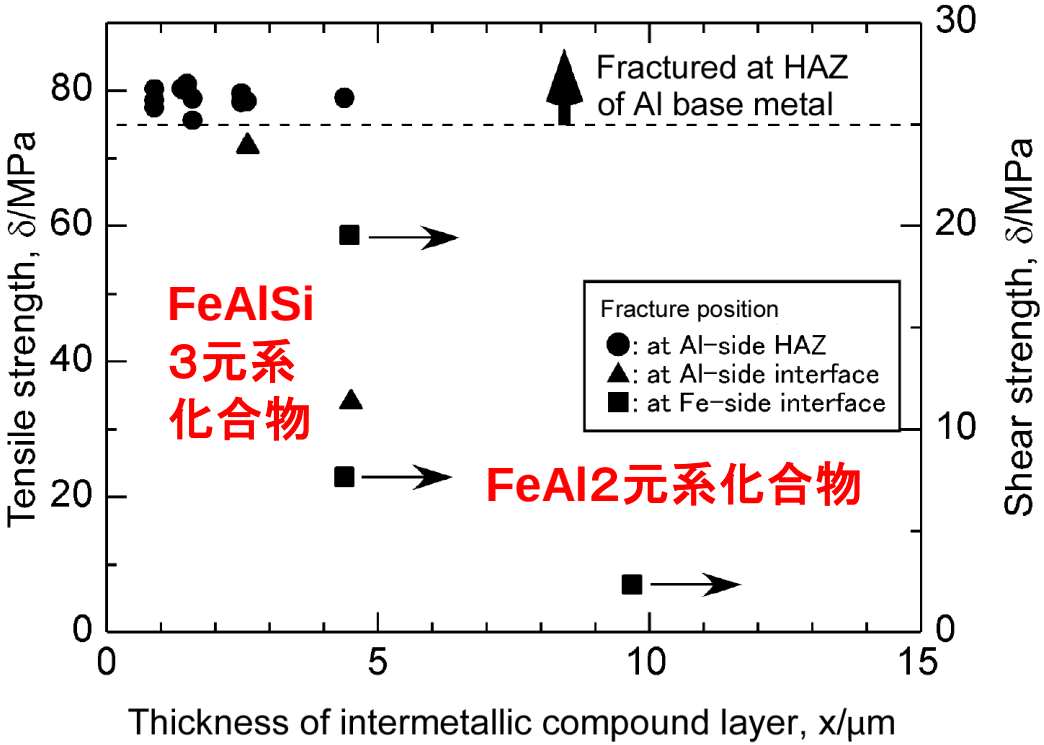
母材よりも融点の低いろう材を用いて、
できるだけ母材を溶融しないで溶接する







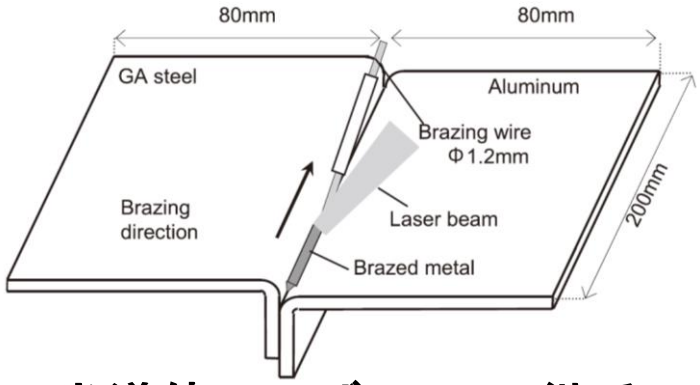
継手：アルミA1050/炭素鋼SPCC
溶加材ワイヤ（フラックス内蔵）
BA4047(Al-12%Si合金)



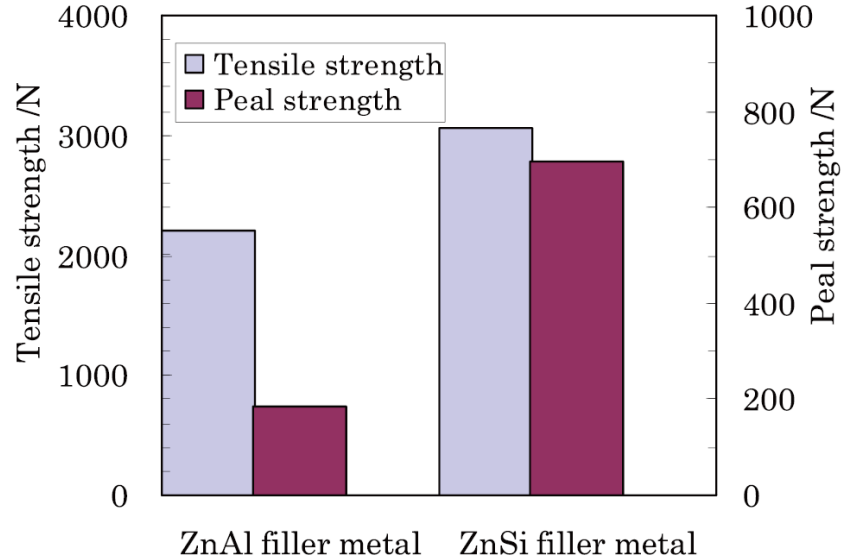
1~3μm厚さでAl母材破断

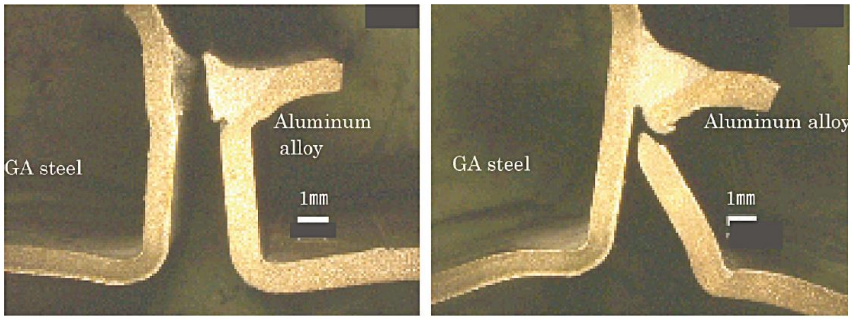
T.Murakami, K.Nakata et al:ISIJ Int.43(2003)1596.

Zn-Si溶加材の出現とレーザブレージングによるアルミ合金／亜鉛めっき鋼板の異材接合



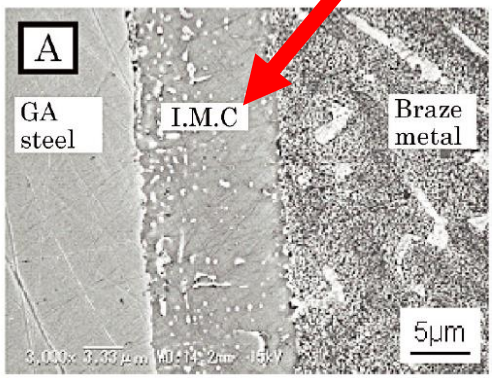
半導体レーザ、フレア継手
GA鋼板／6022Al合金



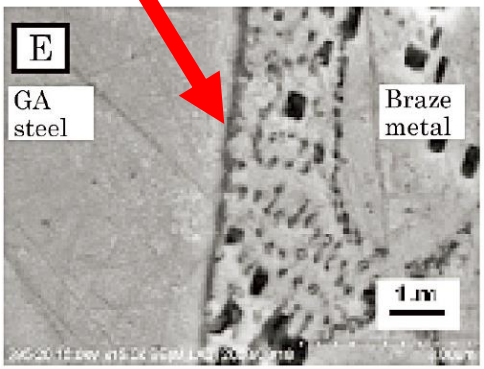


Zn-6%Al溶加材 ろう付部破断
Zn-1%Si溶加材 Al合金母材破断

ピール試験後の継手断面



Fe-Al化合物
厚さ10μm



Fe3Al2Si3化合物
厚さ100nm程度
α–Fe／結晶整合性良好

（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)

金属の塑性流動利用の固相接合ー摩擦攪拌接合FSW動作ビデオ

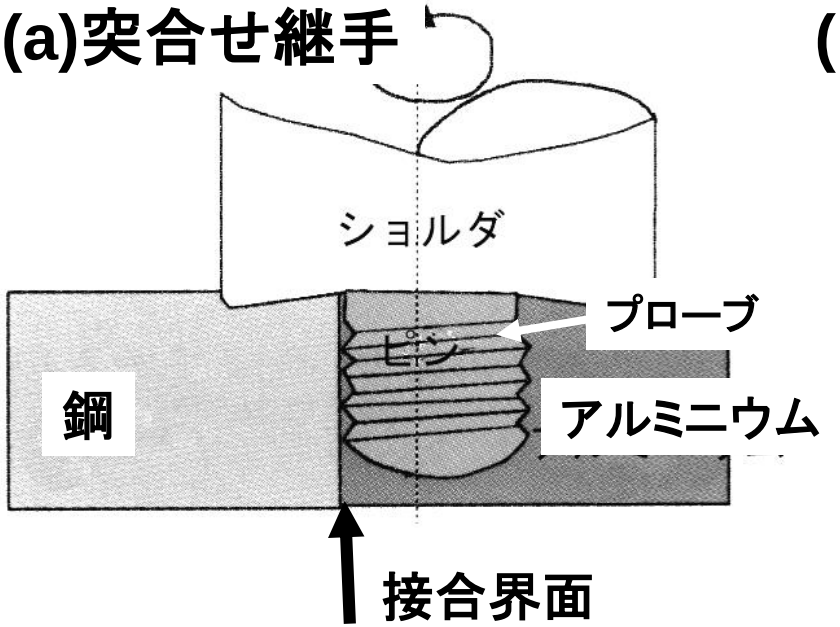
被接合材:アルミ合金板、板厚6mm

FSWによるAl合金／鉄鋼の異種材料接合の提案

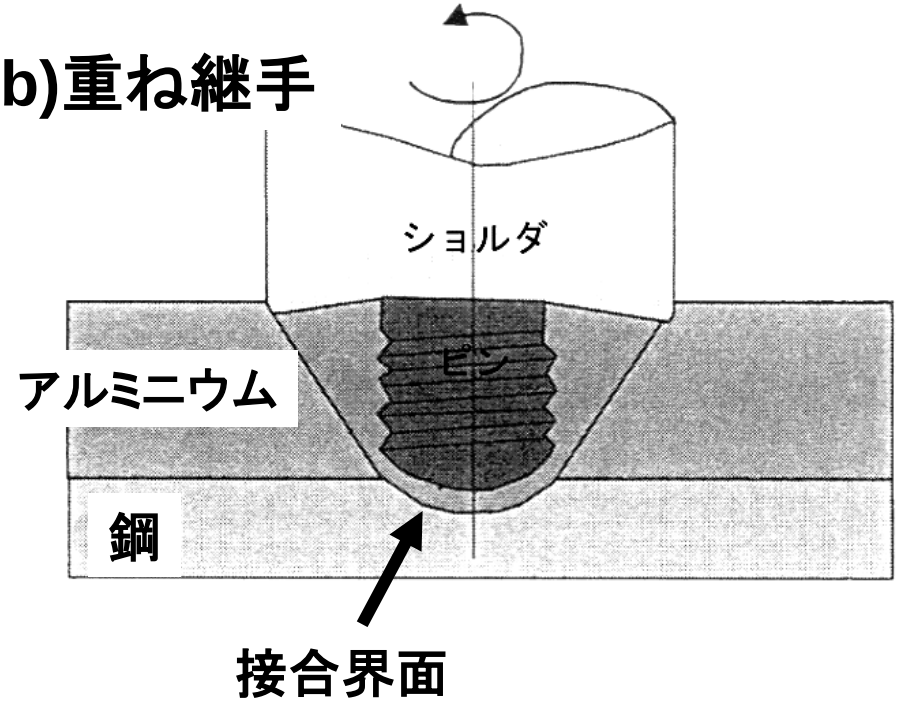
- 回転プローブによる接合界面の清浄化／活性化
- 低温・短時間接合と金属の塑性流動の活用

接合部断面とピン挿入位置

(a)突合せ継手



(b)重ね継手



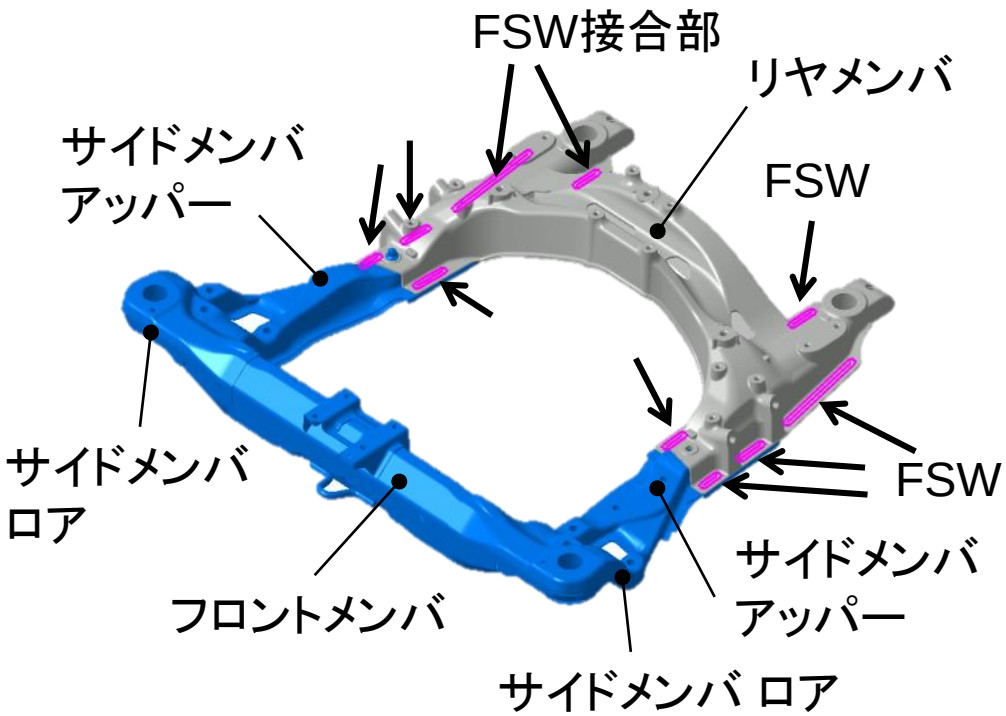
岡村ら：溶接学会誌72(2003)436.

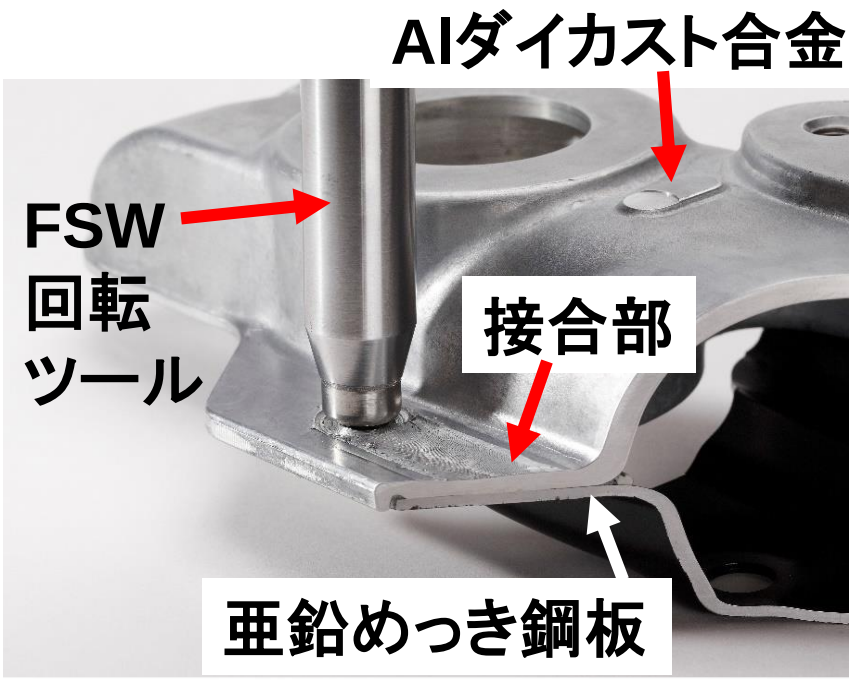
岡本ら：軽金属溶接 42(2004)49.

鋼板とAl合金のFSWによる直接異種材料接合
実用化例:ホンダ

サブフレーム
重ね継手への展開

・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.





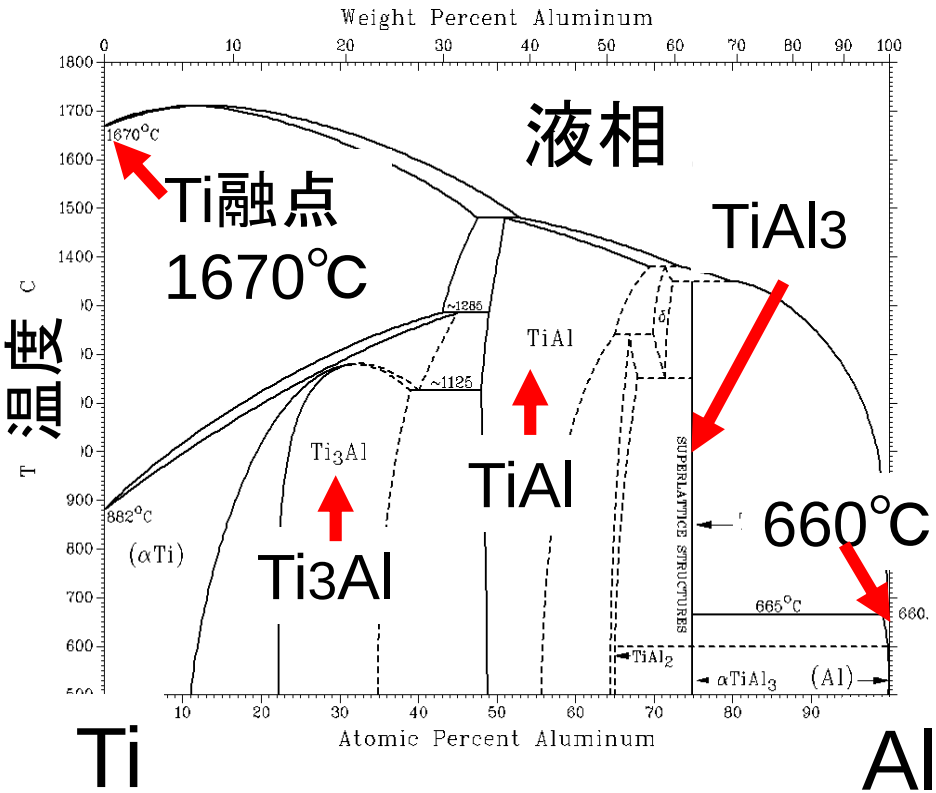
FSW回転ツールと重ね接合部

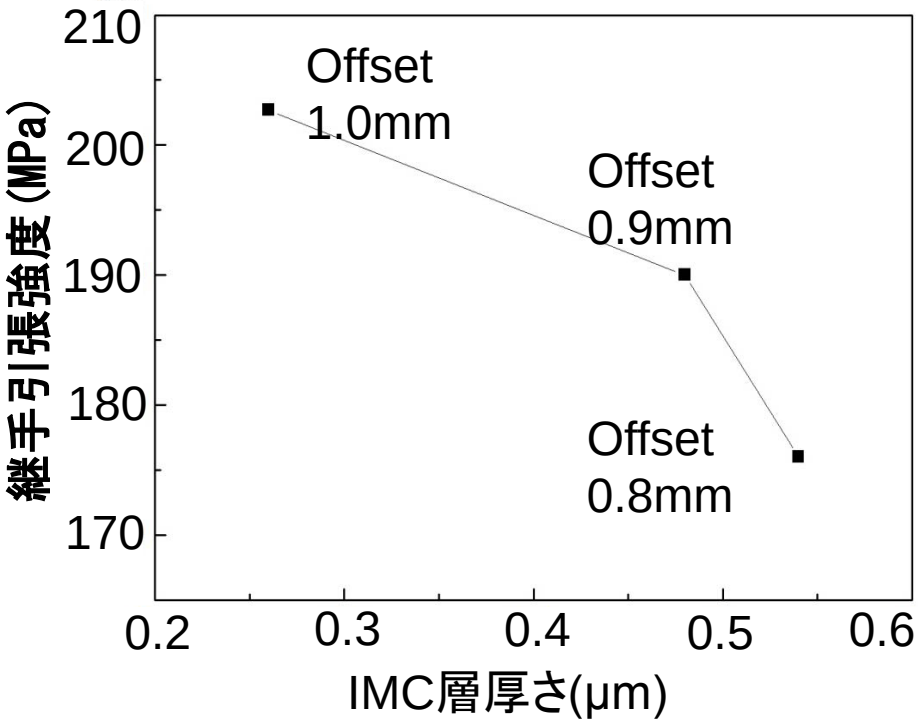
((株)本田技術研究所ご提供）

第2世代異種材料接合

- その他の組み合わせ例
  - アルミ／チタン
  - 鉄／チタン

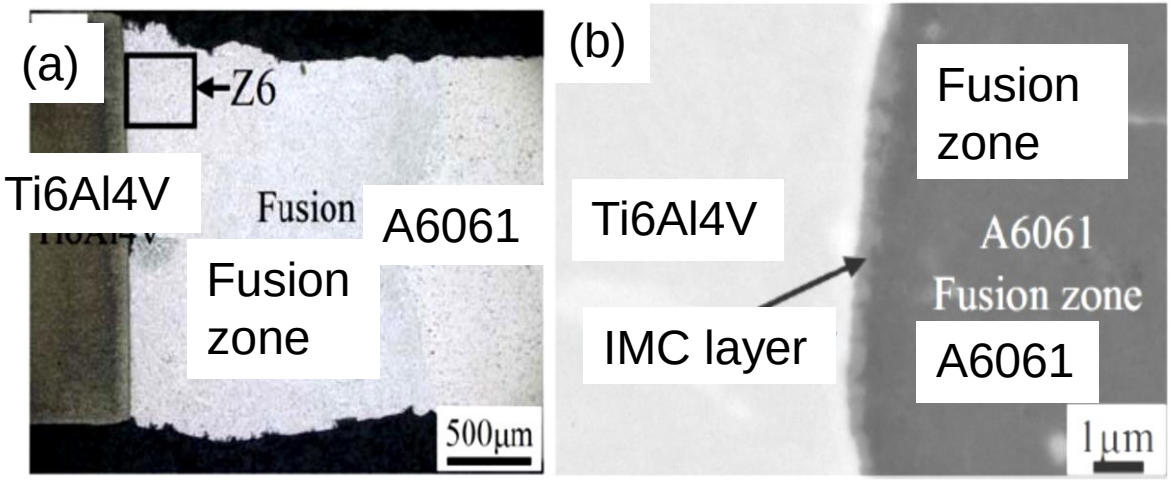
レーザ溶接によるアルミ／チタンの組合せ例



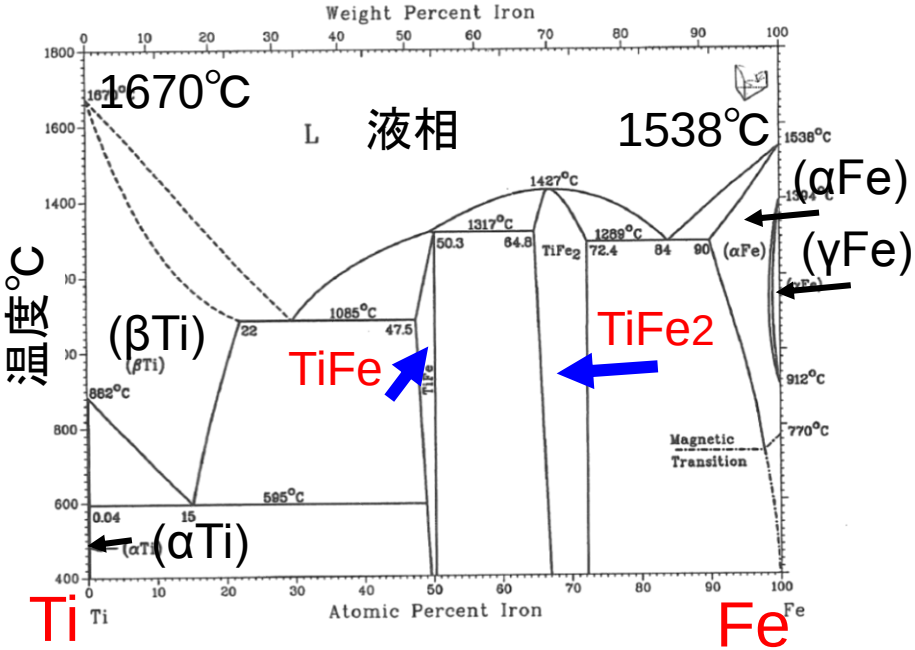


狙い位置Offset:1.0mmアルミ側へ

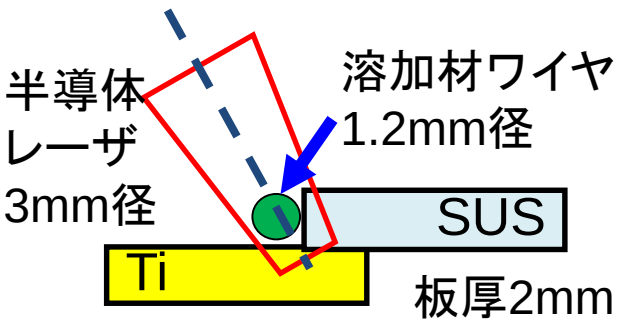
A6061／Ti6Al4V
板厚2mm、突合せ継手
ファイバーレーザ溶接
4kW,4m/min,
ビーム径0.48mm



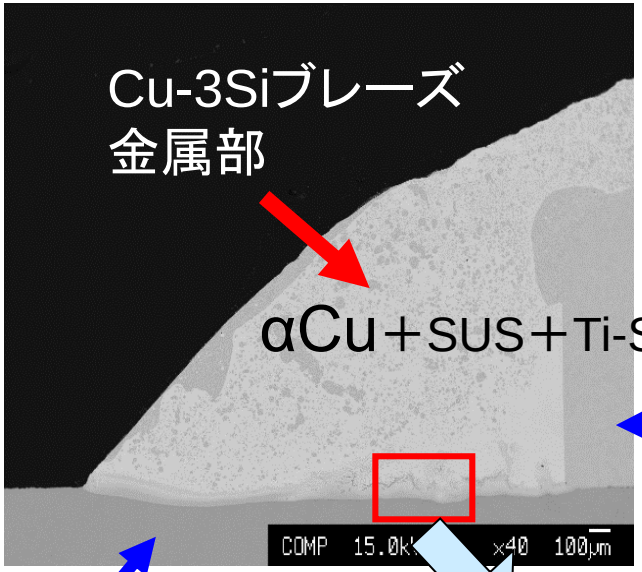
チタン／SUS304:レーザブレージング重ね隅肉接合



2種類の金属間化合物形成のために直接溶接は困難



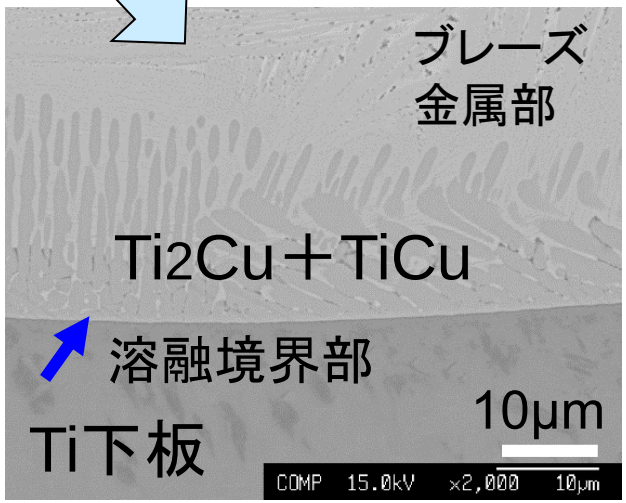
レーザブレーズ重ね異材継手配置



SUS側には金属間化合物は形成されず

SUS 304上板

Ti下板



Ti側に金属間化合物が形成

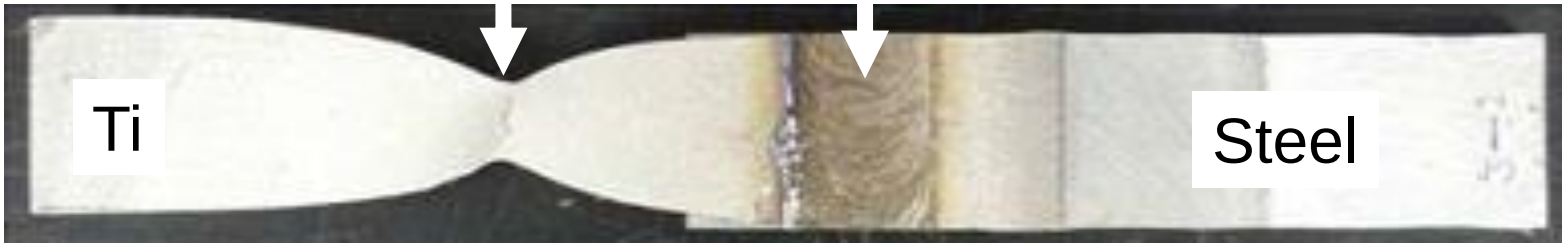
レーザブレーズ継手断面組織

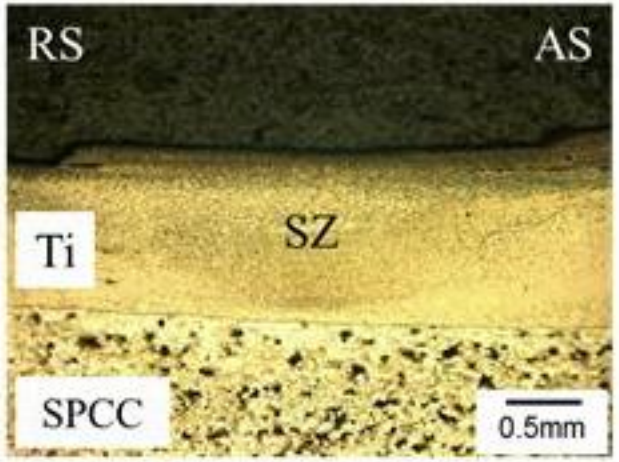
菅、中田ら:スマートプロセス学会誌、6-1(2017,33-39)

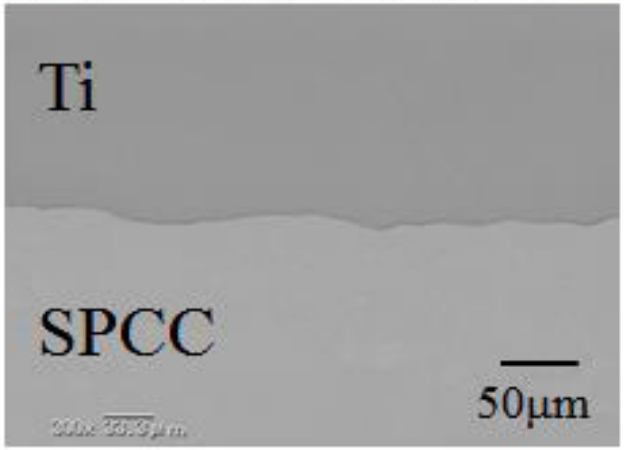
Cu合金ワイヤによるSUS上板／Ti下板の配置でチタンクラッド鋼JIS規格値140MPaを満足する重ね異材隅肉継手(継手強度170～180MPa)の形成が可能

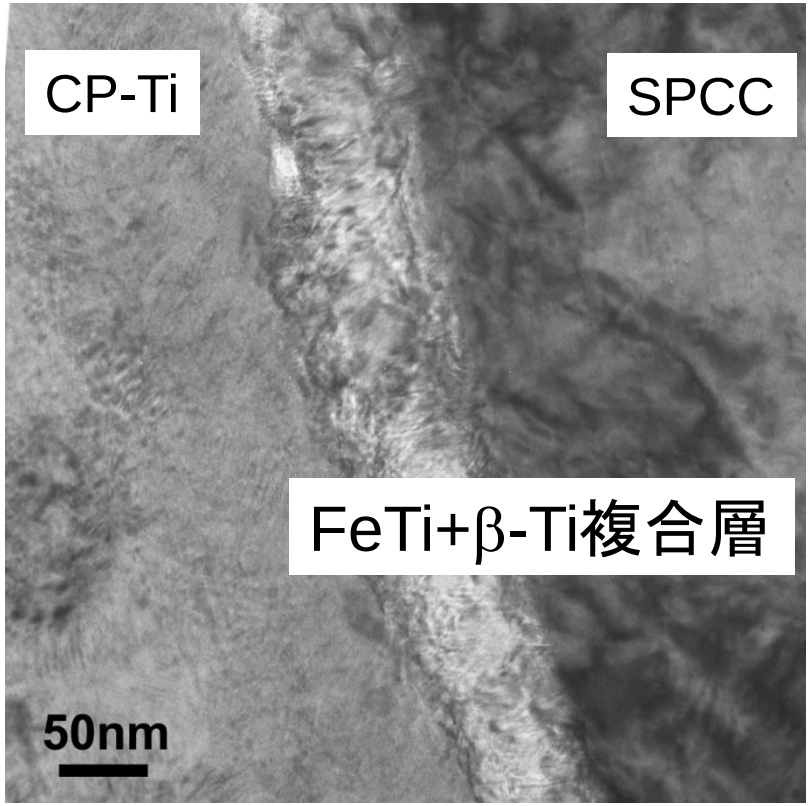
FSWによる純チタン／鉄鋼SPCCの重ね異材接合

Ti母材破断部　接合部









引張せん断試験後の外観と界面組織

（Y.Gao, K.Nakataら:Materials & Design, 65(2015)17-23）

第3世代異種材料接合

・異なる材料間の接合

・金属／樹脂・CFRP

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シーから成る。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シーの接合にも接着剤が使用されている。

日経ものづくり2016.6月号より

図4　BMW社の高級車「7シリーズ」

(a) 外観。(b) ボディーの構造。鋼板とアルミ合金、CFRPの複合構造を採用した。グレー色の部分が鋼板，白色の部分がアルミ合金，黒色の部分がCFRPとなっている。

BMW-7シリーズ

- ハイテン鋼
- アルミ合金
- CFRP

日経ものづくり2016.6月号より

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

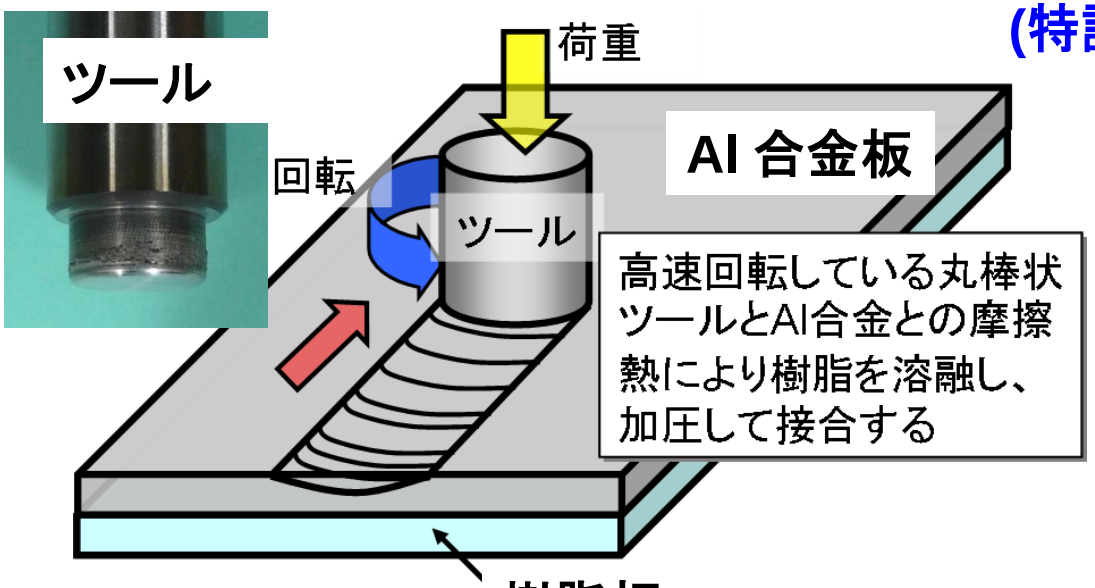
・レーザ接合法（レーザエネルギー利用）

・摩擦重ね接合法（摩擦エネルギー利用）

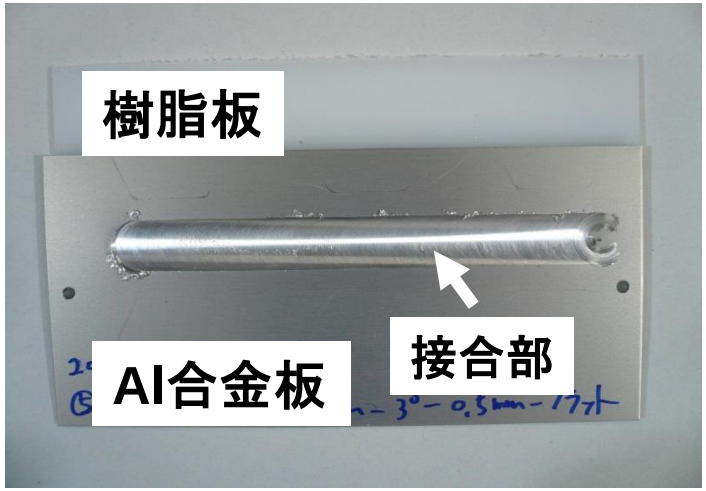
マルチマテリアル化に向けた多様な接合方法の整備が必要：継手形状、特性、量産性、コストなど

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）

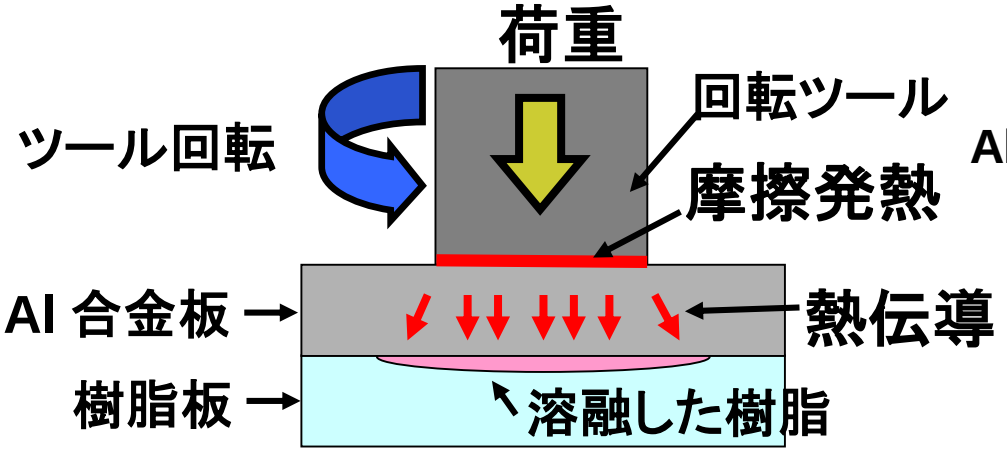
(特許第5817140号、H27.10.9登録)



FLJ接合法概略図



接合継手外観

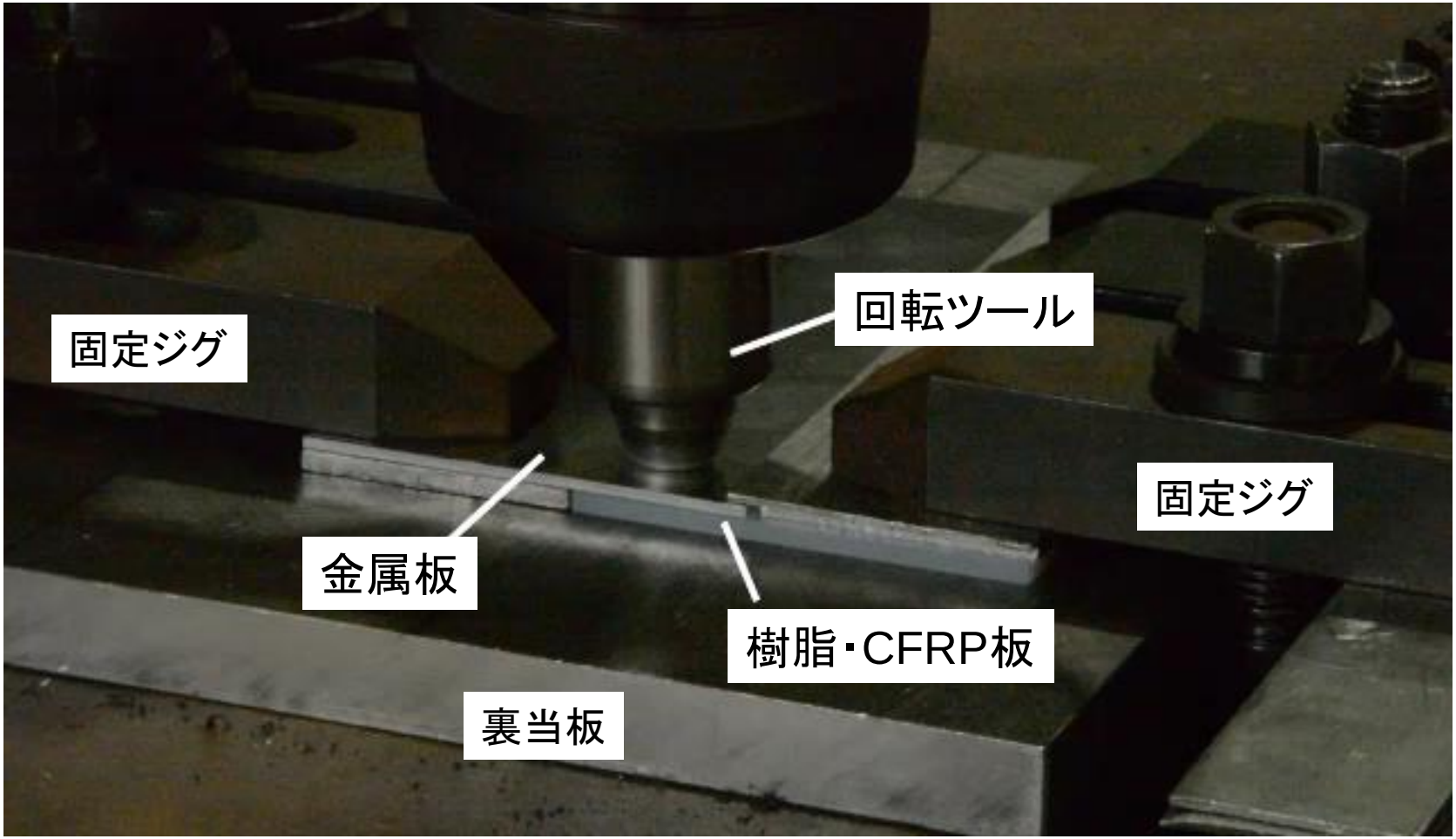


接合機構

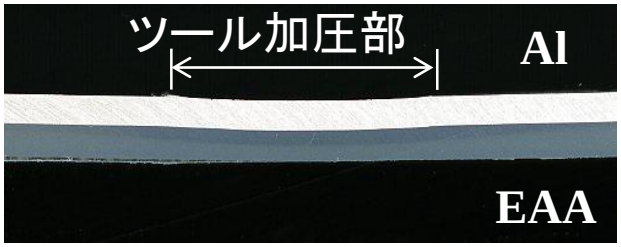
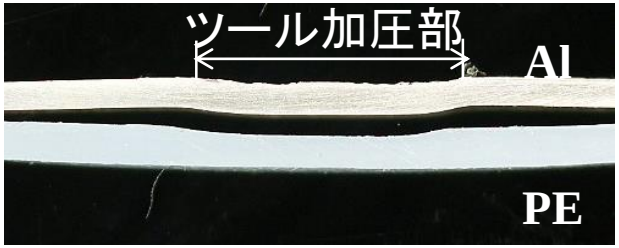
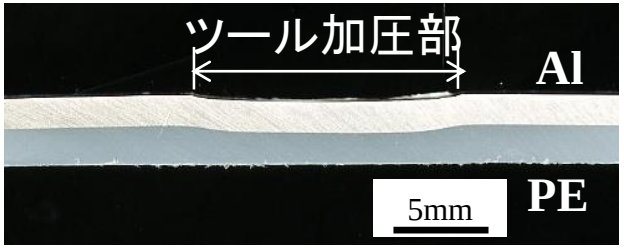
接合継手断面

(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



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

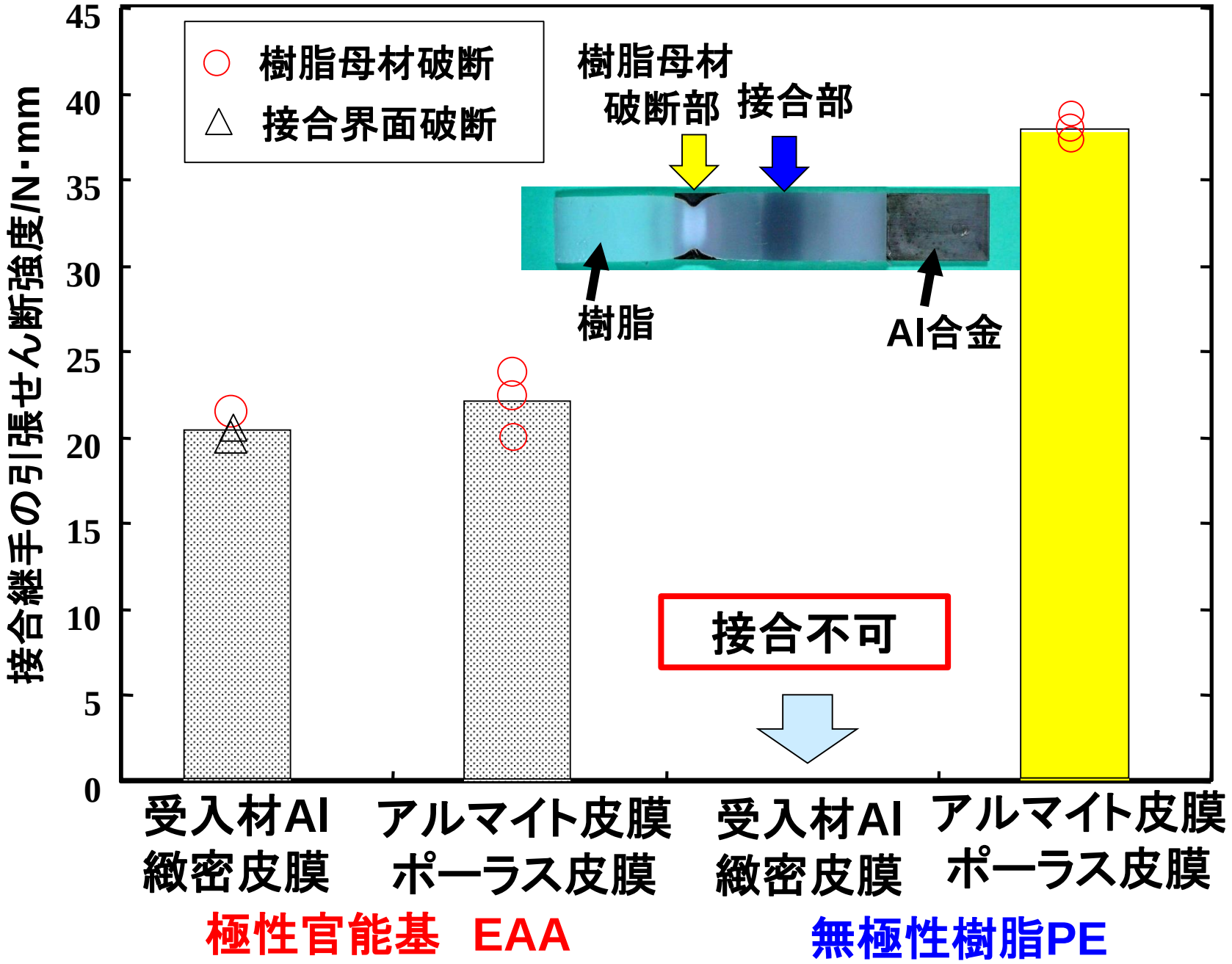
PE：ポリエチレン

無極性：極性官能基なし

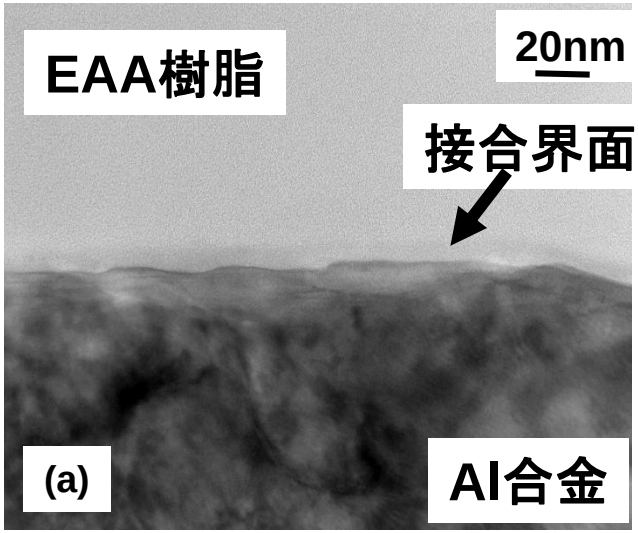
アルマイト皮膜処理アルミ合金では接合可能

＊アルミ合金表面特性：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

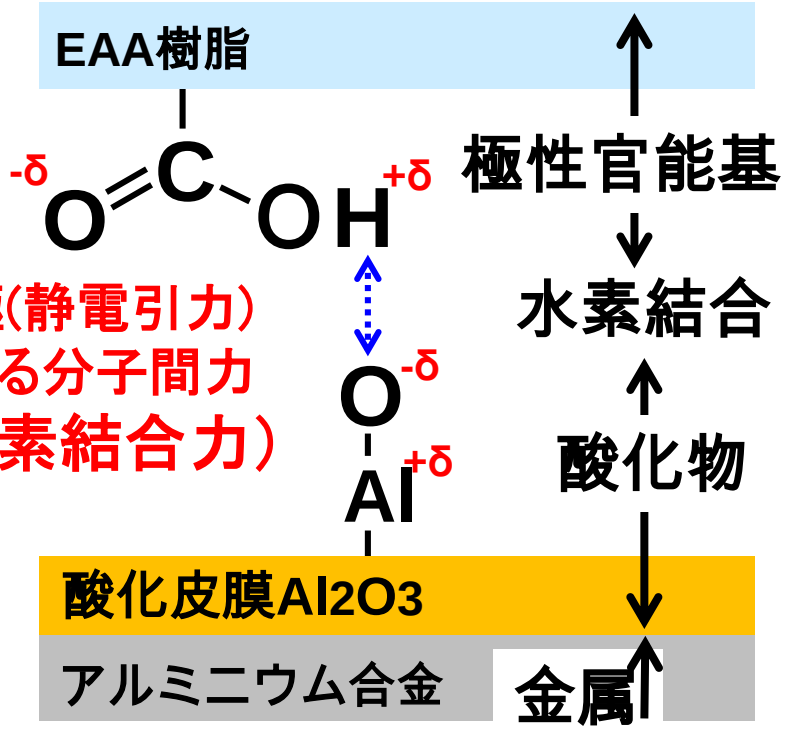


想定される金属／樹脂の直接接合機構

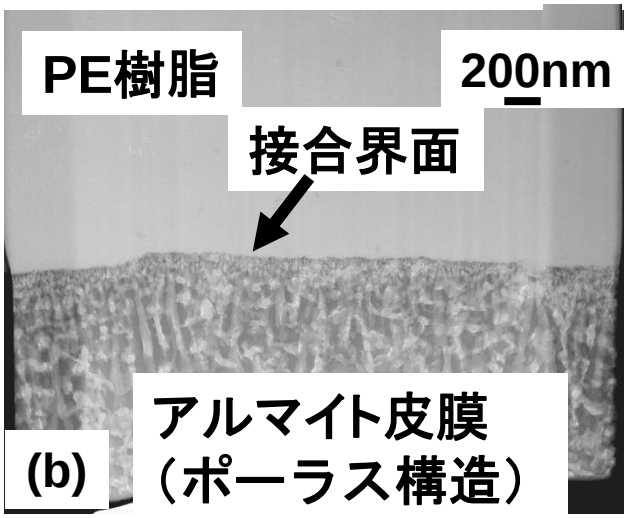


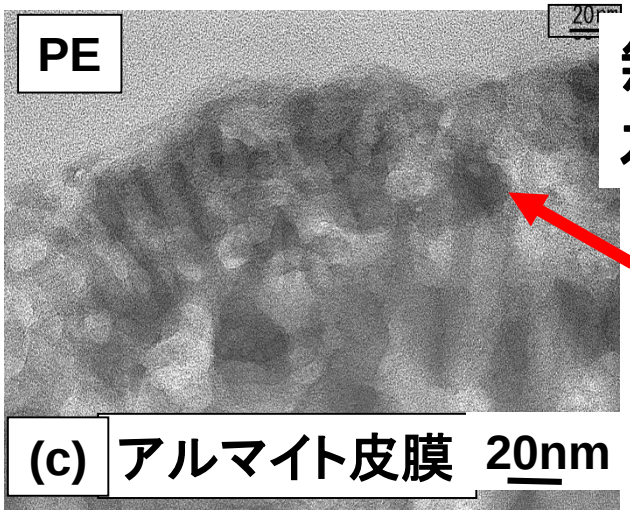
6nm

自然酸化皮膜
(Al_2O_3)



接合界面構造：受入材のままのAl合金





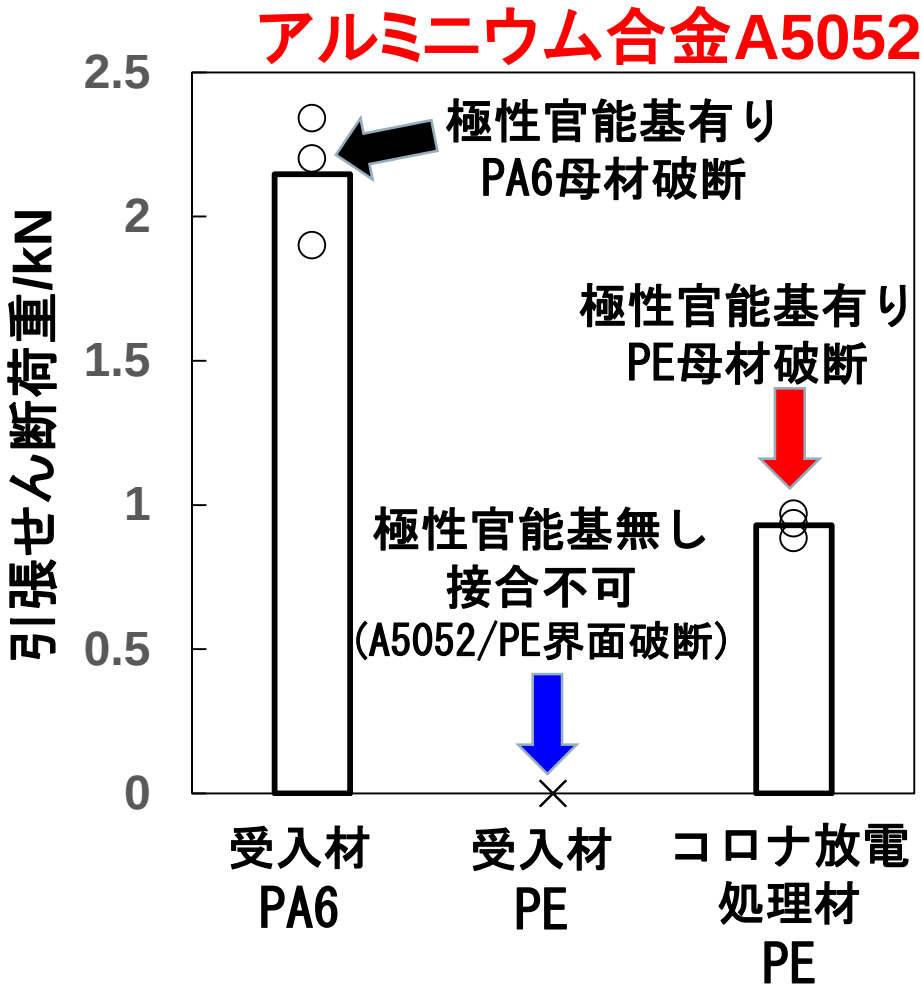
無極性のPE樹脂では
水素結合はない

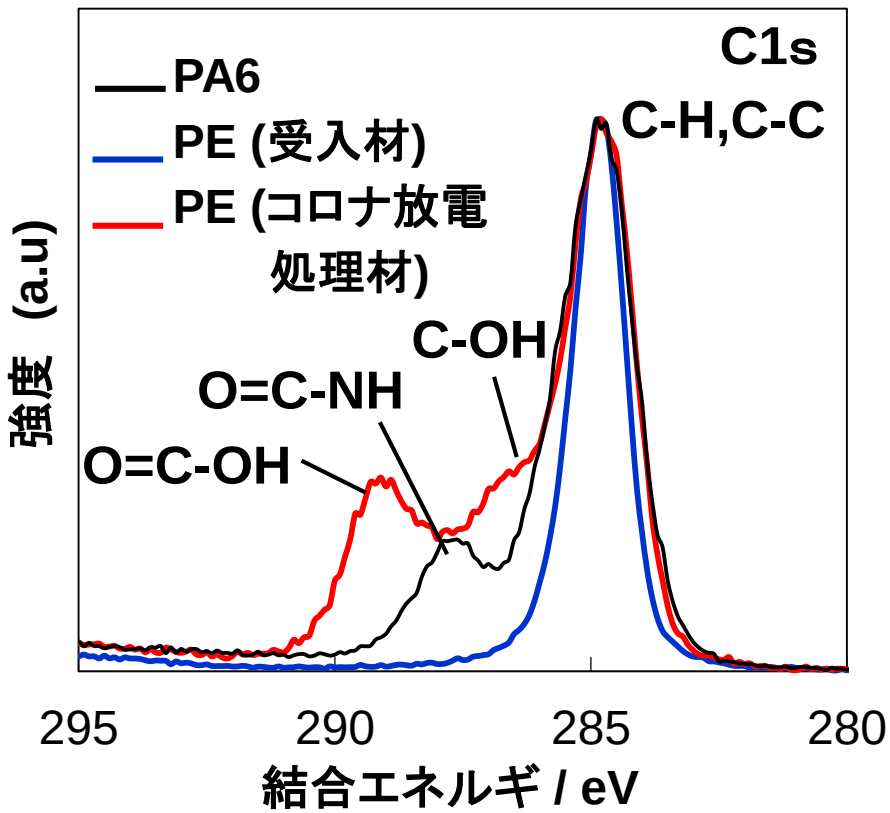
ポア内への
樹脂の侵入

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

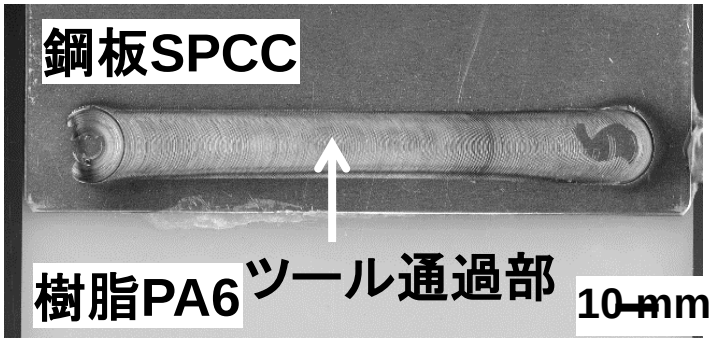




ヒドロキシル基(C-OH)およびカルボキシル基(O=C-OH)による水素結合の効果を示唆

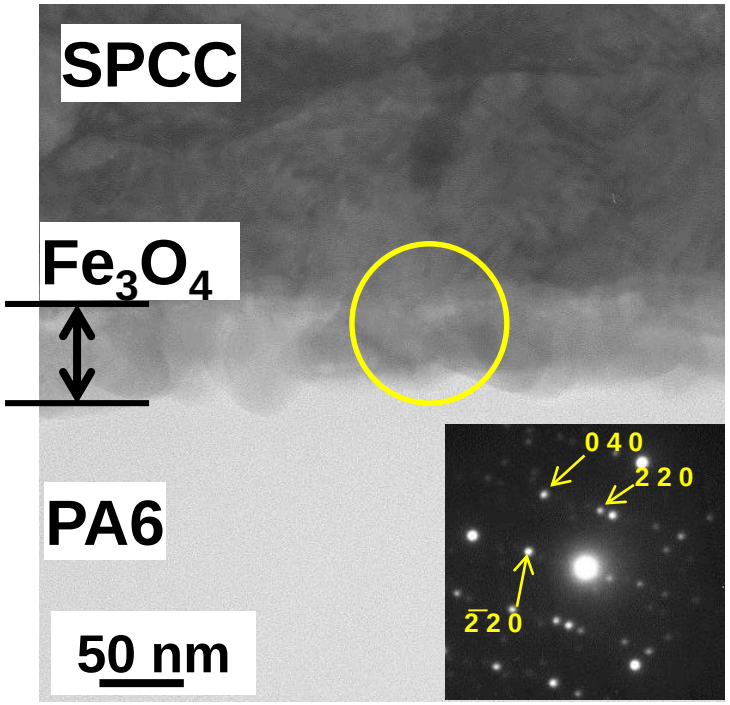
摩擦重ね接合法による鉄鋼材料／樹脂の直接接合

低炭素冷間圧延鋼板SPCC／ポリアミド樹脂PA6



(a) 継手外観

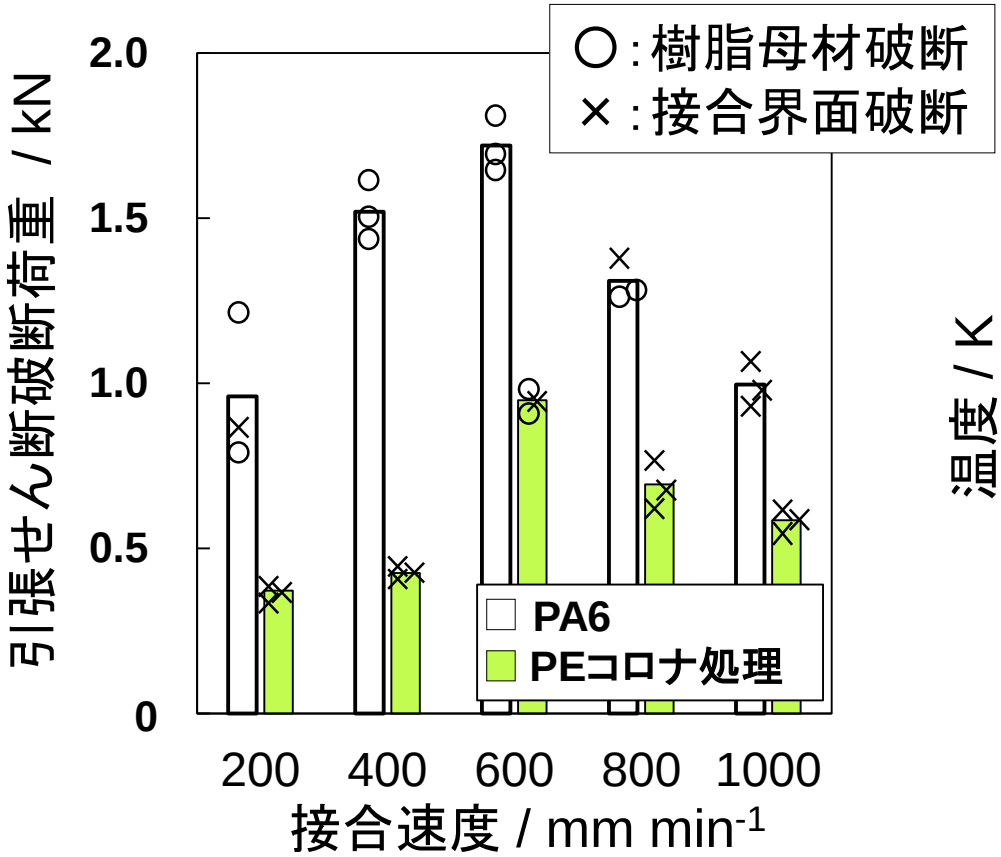
(b) 継手断面マクロ組織

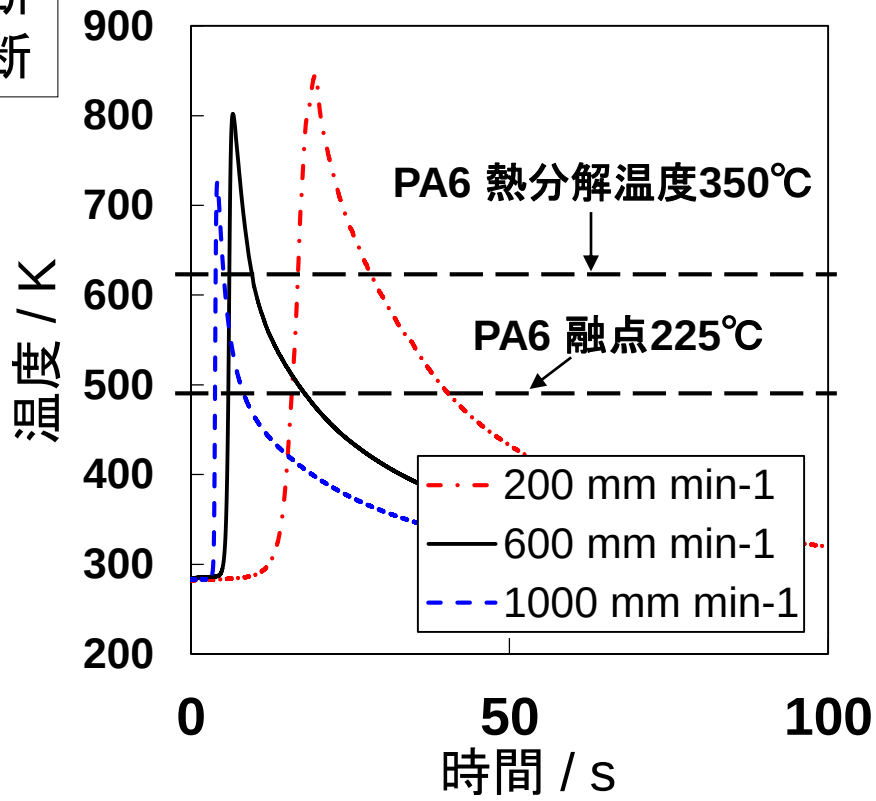


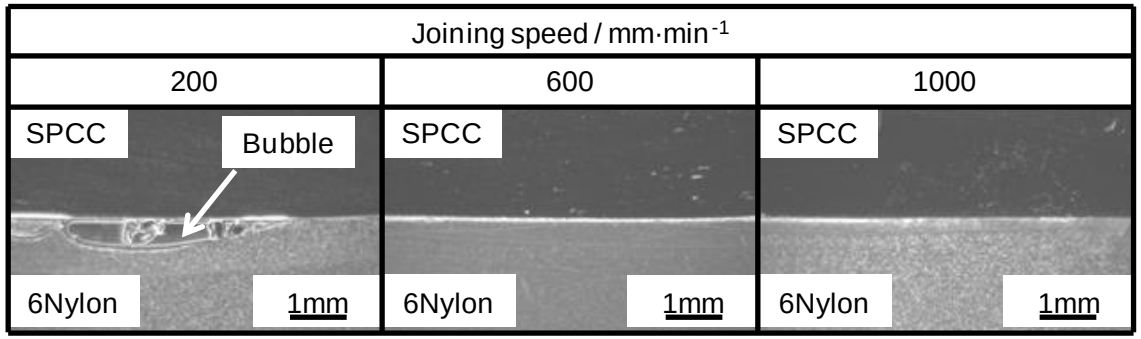
(c) 接合界面微細構造

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





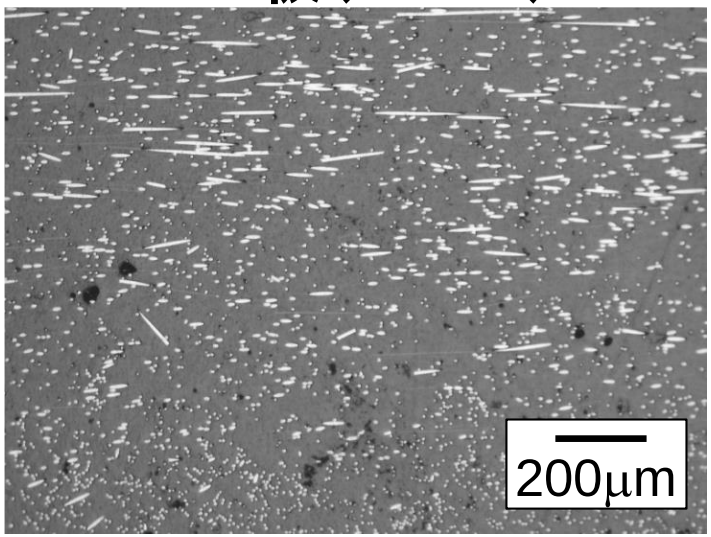


接合部断面マクロ組織

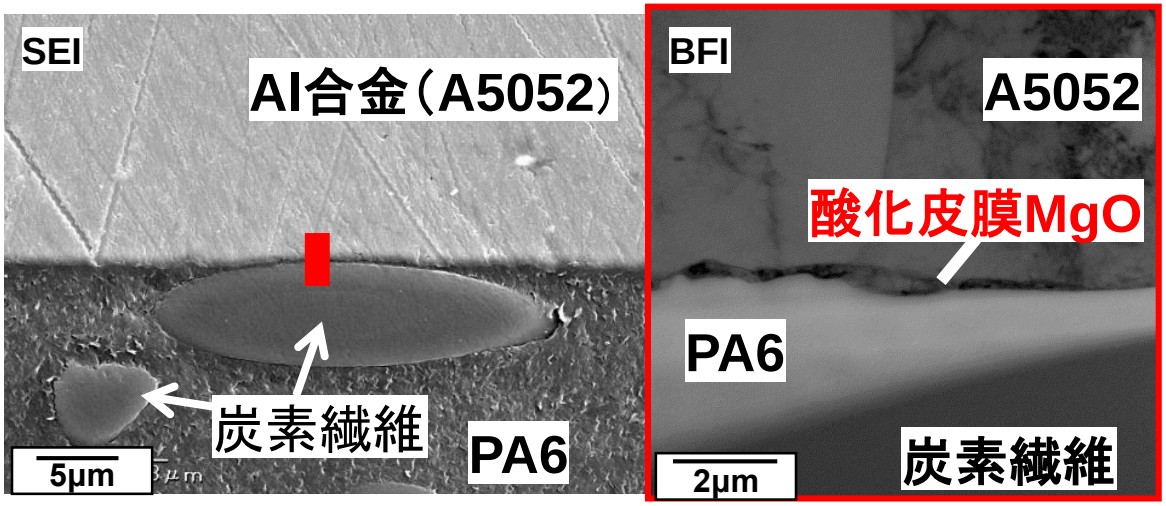
接合速度：最適値が存在
低速度：気泡と樹脂の熱劣化
高速度：接合面積の減少

摩擦重ね接合法によるAl合金／熱可塑性CFRPの直接接合

射出成形法による
CFRP板（3mmt）

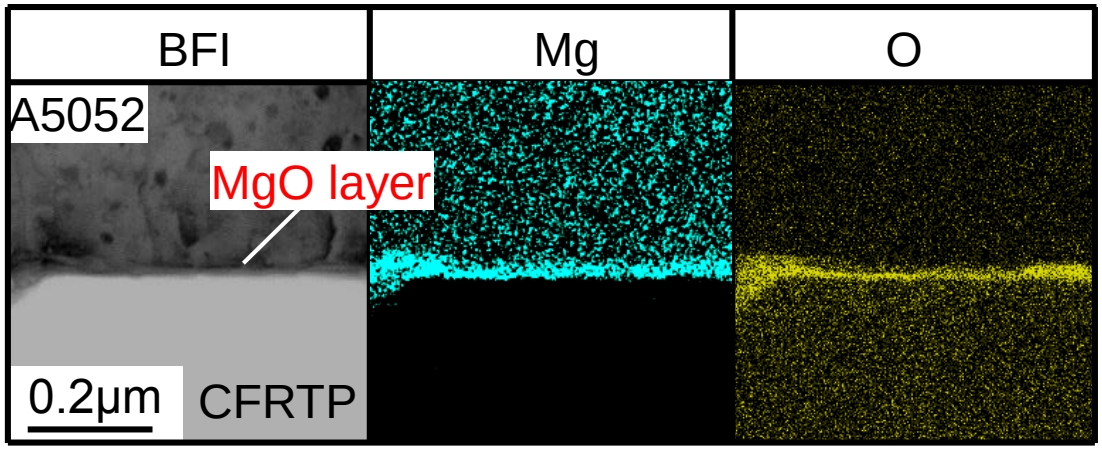


接合界面構造



炭素繊維：長さ200μm
直径5～10μm
20wt%

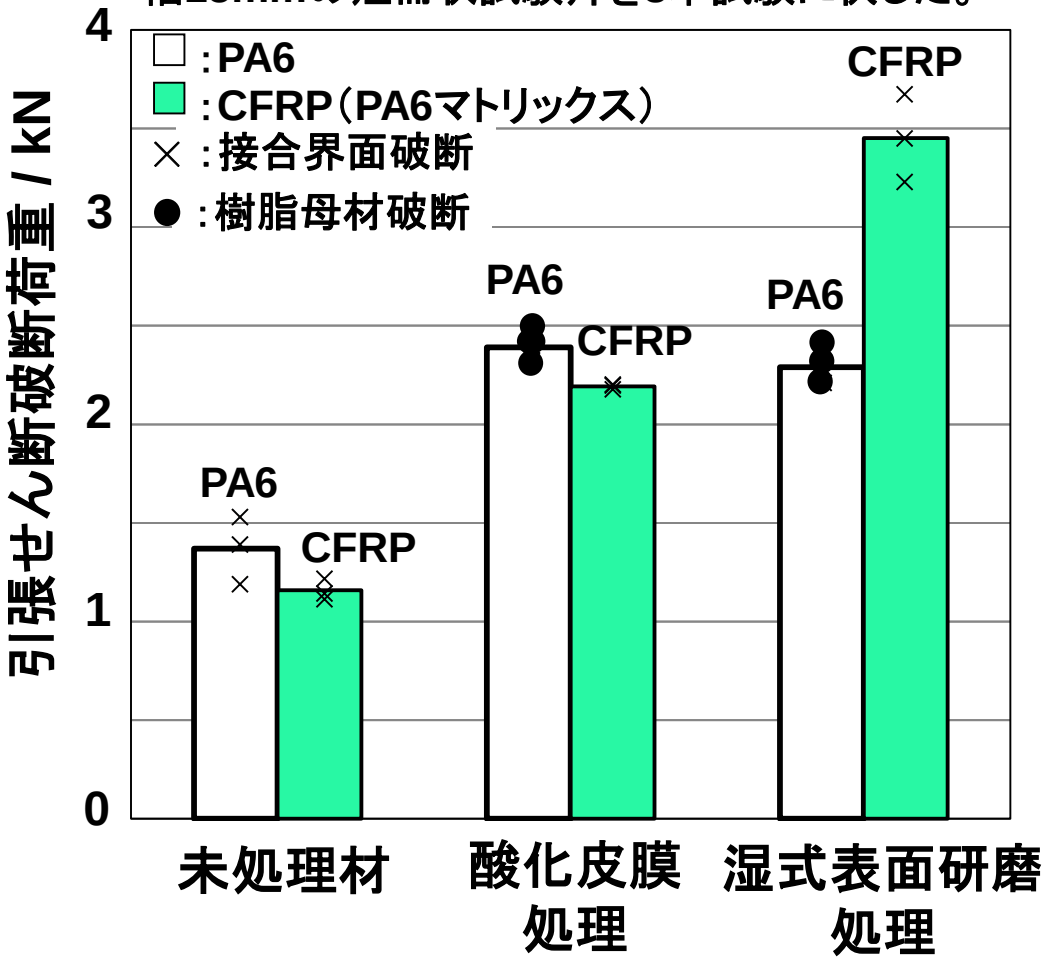
マトリックス：熱可塑性樹脂
PA6



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

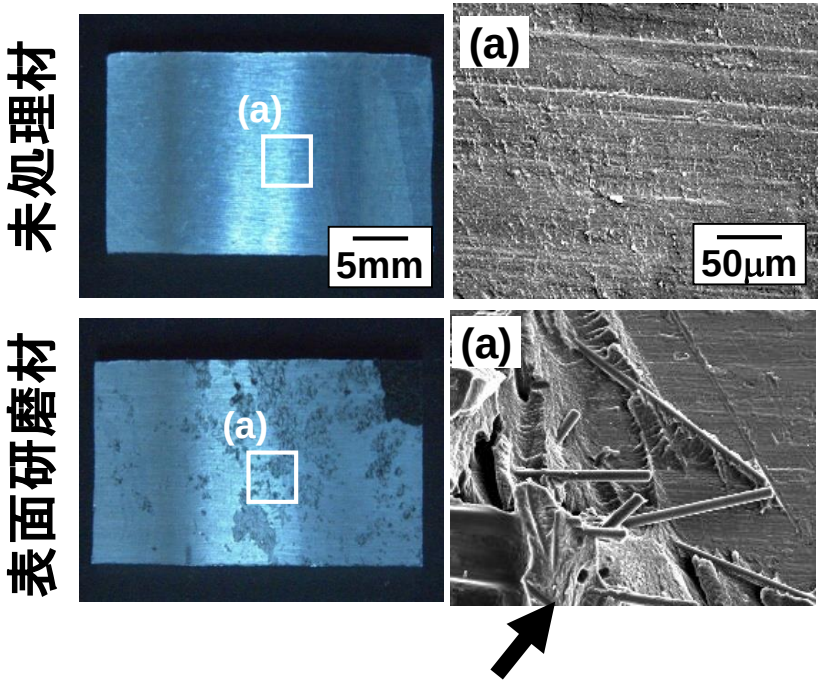
A5052 / PA6･CFRP接合継手引張せん断強度に及ぼす各種表面処理の影響

幅15mmの短冊状試験片を3本試験に供した。



アルミニウム合金A5052の表面処理

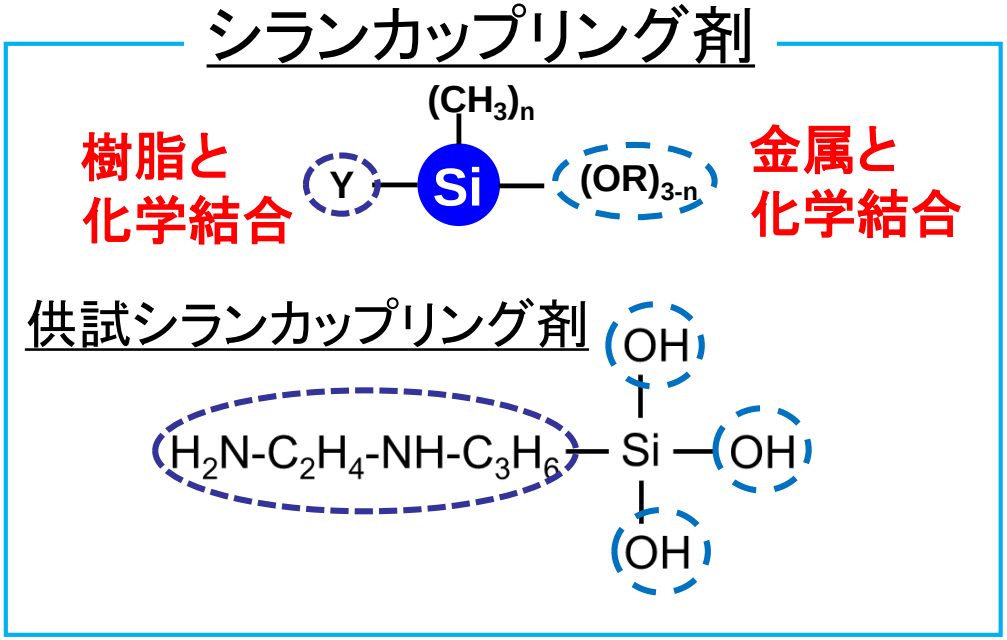
アルミニウム合金側破断面形態

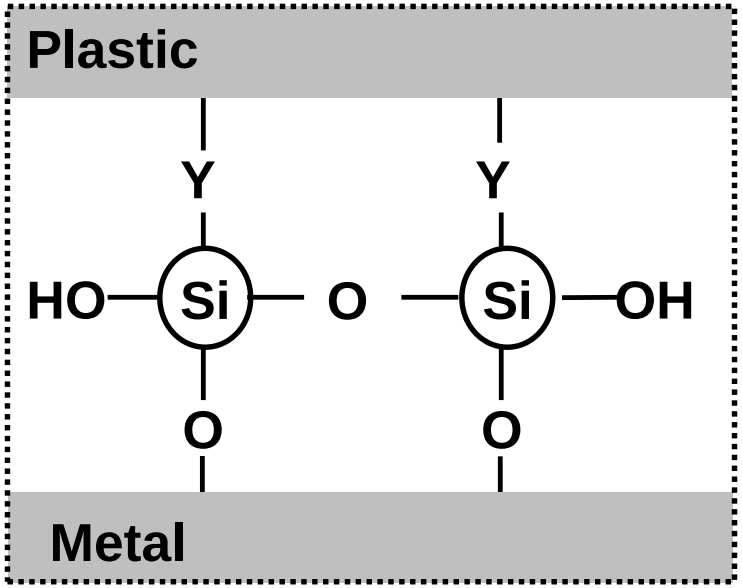


CFRP母材の部分層間剥離

FLJ条件：
ツール回転数：2000rpm
接合速度：400mm/min

より強い接合強度：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



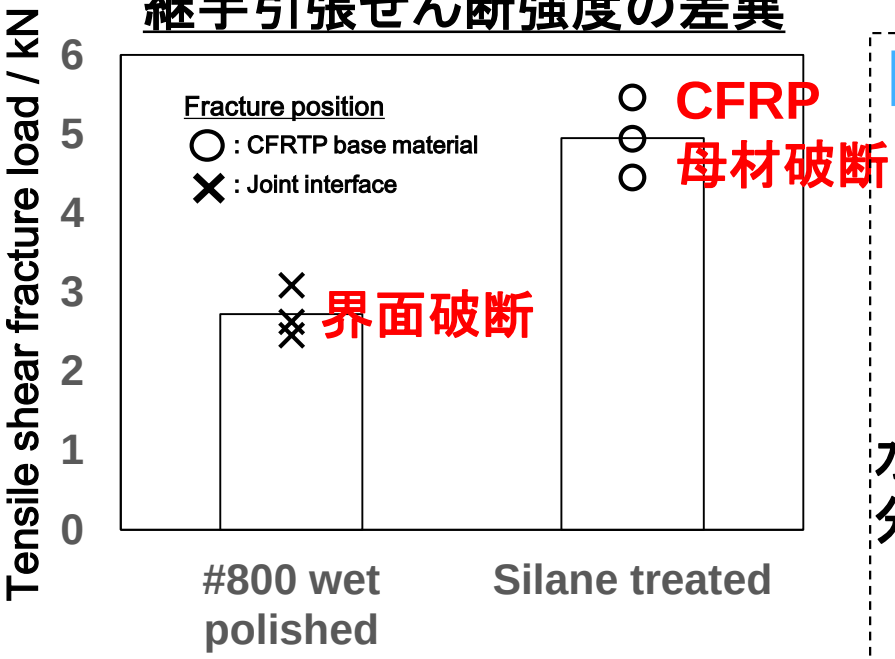


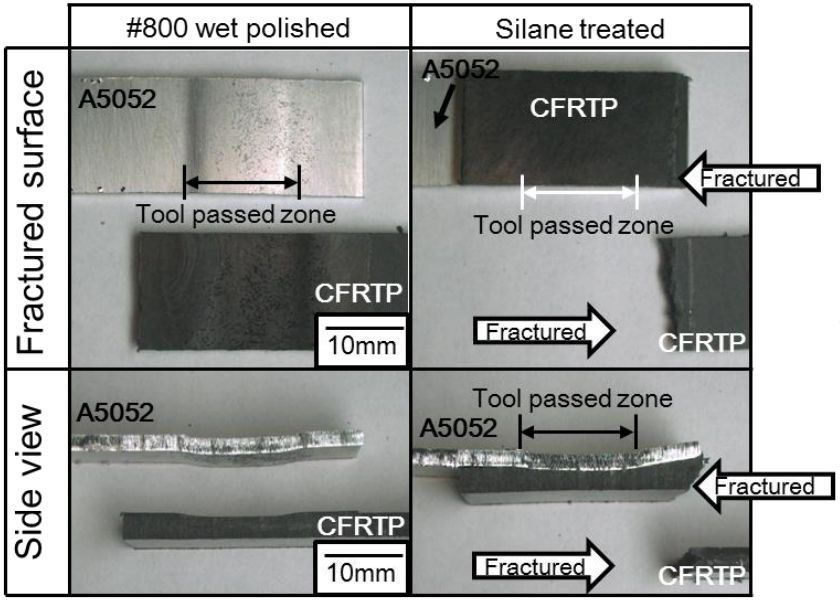
金属表面へのシランカップリング処理:アルミニウム合金、鉄鋼

- #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

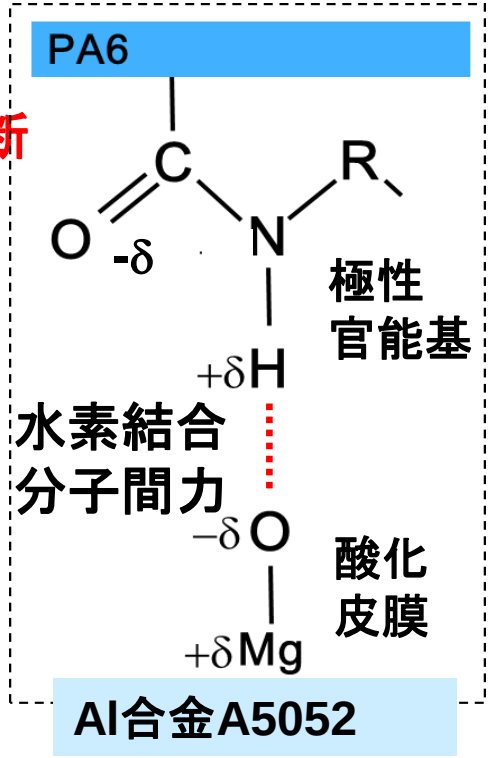
Al合金表面へのシランカップリング処理の効果

継手引張せん断強度の差異

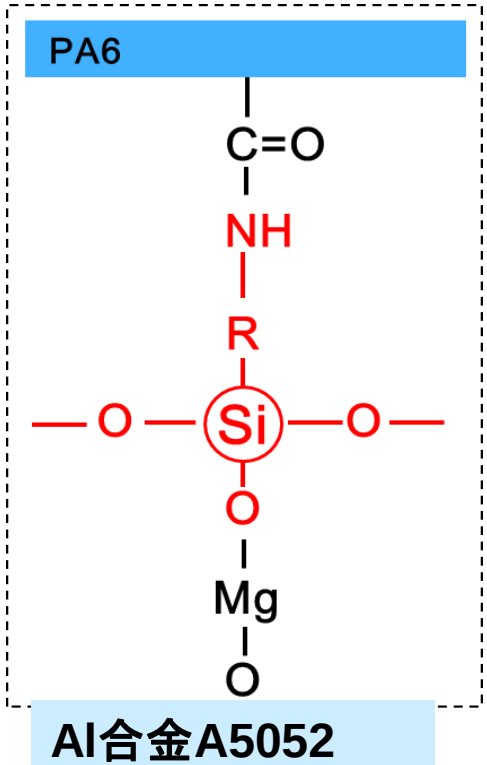




湿式研磨処理



シランカップリング処理



1. 水素結合
2. アンカー効果
3. （ﾌｧﾝﾃﾞﾙﾜｰﾙｽ力）

<

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

化学結合（共有結合）により
継手強度上昇（反応層形成）

永塚、中田ら：溶接学会論文集、33-4（2015）317-325

アンカー効果に有効な注目される金属表面処理

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

・大成プラス株式会社[1)]

NMT(Nano molding technology), NAT(Nano adhesion technology)

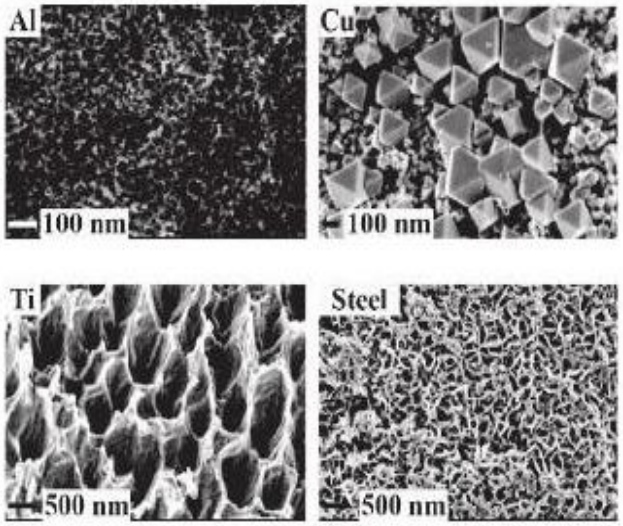
化成処理により数十～数百nmの凹を形成し、アンカー効果で接合する。

炭素鋼, SUS材, Al, Mg, Cu, TiとPPS、PA6等の異材接合において、
せん断強度(20℃)は、射出接合で40-50MPa、エポキシ系接着剤併用で60-70MPa

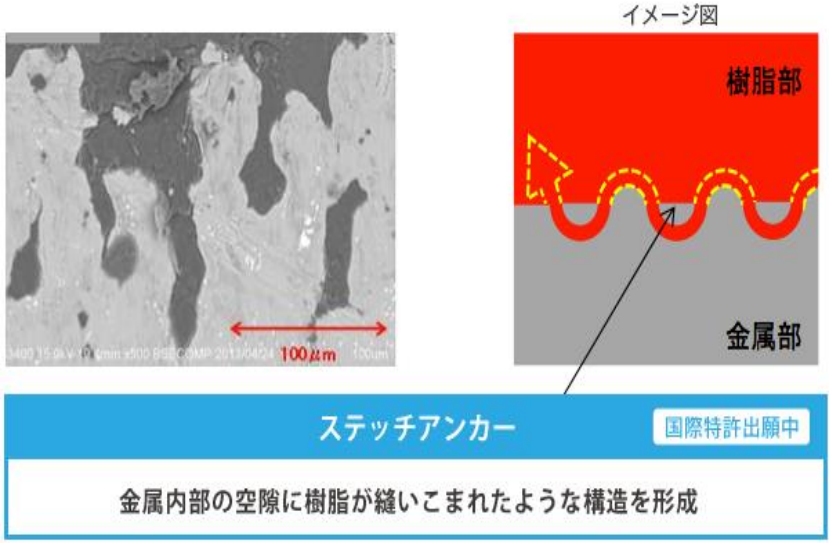
・ダイセルポリマー株式会社[3)]

DLAMP®

レーザ照射によって表面に複雑な凹凸を形成し、ステッチアンカー効果により接合
せん断強度は、射出接合で40-50MPa程度



化成処理後の金属表面[2)]

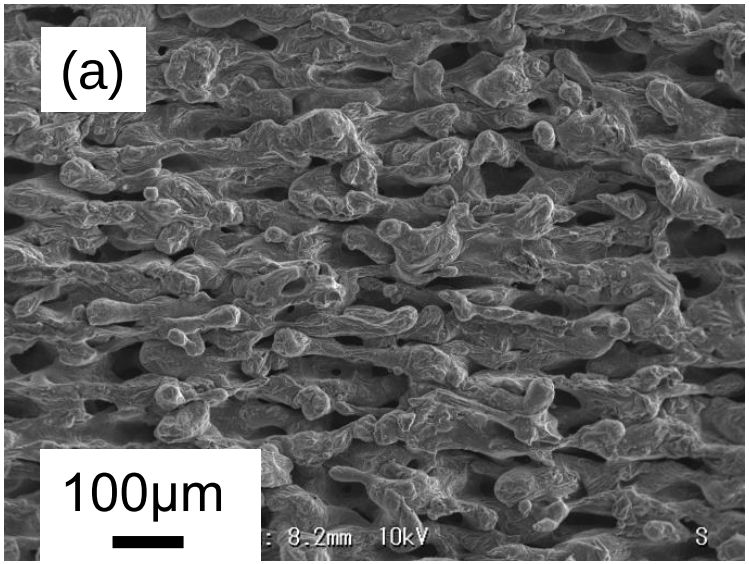


DLAMPを適用した継手の断面[3)]

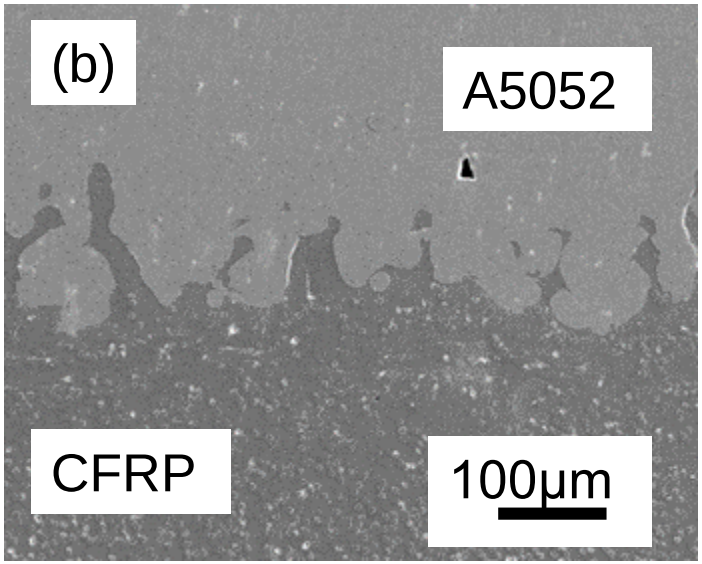
1) http://taiseiplas.lekumo.biz/blog/index.html
2) 堀内伸, 計測と制御, Vol.54, No.10 (2015) 743.
3) http://www.daicelpolymer.com/ja/topics/archive/1404DLAMP/

摩擦重ね接合法によるAl合金／CFRP継手に及ぼすAl合金表面へのDLAMP処理の効果

DLAMP処理をした
Al合金表面状態



摩擦重ね接合界面の
ミクロ組織



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CFRP母材破断を示す。

DLAMP処理はダイセルポリマー（㈱）のご好意による

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

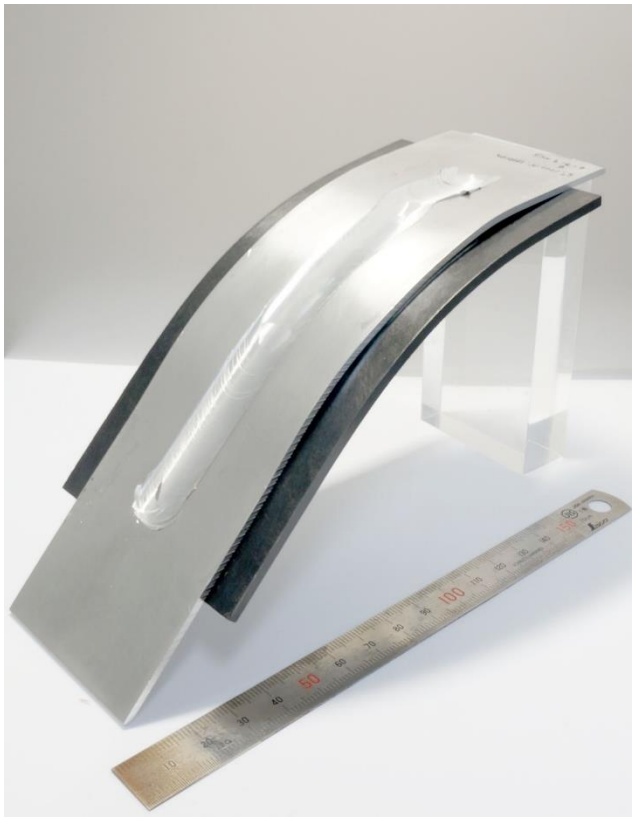
・化学結合:共有結合力

・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

ロボット接合システムによる3D接合継手の形成

摩擦重ね接合FLJ
によるアルミ合金／
CFRP曲面重ね継手



摩擦撹拌接合FSW用ロボットシステム
を活用した摩擦重ね接合

日立パワーソリューションズ㈱と
㈱トライエンジニアリングの設備提供

ご清聴有難うございました

本講演内容のうち、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：
中田一博著：
『マルチマテリアル時代の接合技術
　ー異種材料接合を用いたものづくりー』
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

連絡先：nakata@jwri.osaka-u.ac.jp
大阪大学接合科学研究所
特任教授　中田一博