

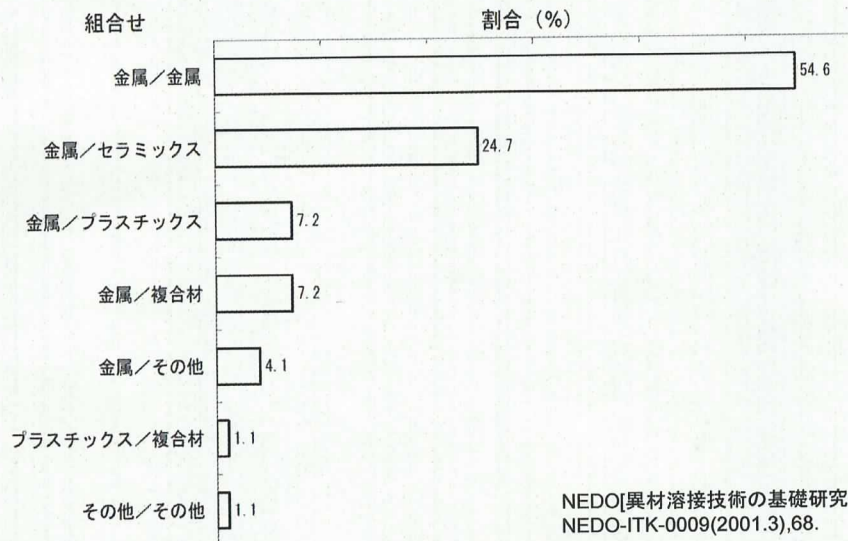
# 異種材料接合の現状と今後の展開

大阪大学 接合科学研究所  
中田 一博

平成25年8月5日

機能性複合材料研究会  
於、九州工業大学

## 将来的に必要なと考えられる異材継手の組み合わせ



NEDO[異材溶接技術の基礎研究]  
NEDO-ITK-0009(2001.3),68.

## 異材接合の目的:

異なる機能を有する材料を適材適所で  
使用して、部材の多機能化、高機能化、  
高付加価値化、コスト削減等を図る

## 材料:

金属、セラミックス(ガラス)、高分子(樹脂)  
(半導体、複合材料、生体材料)

## 異材接合の組み合わせ:

- 第1世代: 同種金属及びその合金
- 第2世代: 異種金属及びその合金
- 第3世代: 異種材料

## 将来的に必要なと考えられる異材継手の組み合わせ: 金属/金属

金属の組合せ		割合 (%)
鉄鋼 (SUSを含む) (62.6%)	鉄鋼/アルミ	27.9
	鉄鋼/鉄鋼	9.7
	鉄鋼/銅	6.7
	鉄鋼/チタン	5.7
	鉄鋼/マグネシウム	1.0
	鉄鋼/その他	11.6
アルミ (18.3%)	アルミ/銅	5.8
	アルミ/マグネシウム	2.9
	アルミ/チタン	1.9
	アルミ/アルミ	1.9
銅 (7.7%)	銅/銅	1.0
	銅/その他	6.7
チタン (3.9%)	チタン/チタン	1.0
	チタン/その他	2.9
その他 (7.5%)	その他/その他	7.7

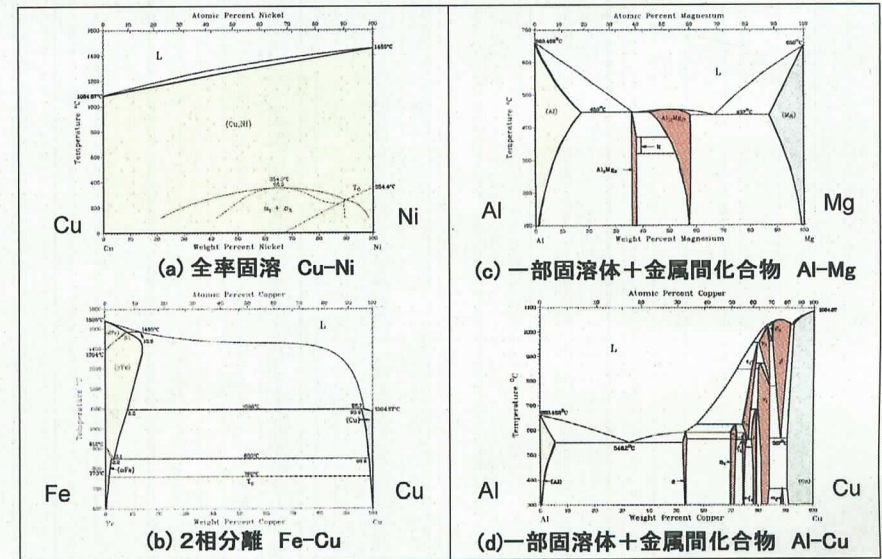
NEDO[異材溶接技術の基礎研究]NEDO-ITK-0009(2001.3),68.

# 将来的に使用したい異材溶接法

接合法		割合 (%)
溶融溶接 (41.3%)	アーク溶接	16.2
	レーザー溶接	12.9
	抵抗溶接	6.8
	電子ビーム溶接	3.8
	ガス溶接	0.8
	各種	0.8
ろう接 (9.1%)		9.1
固相接合法 (28.6%)	拡散接合	4.5
	超音波接合	4.5
	摩擦圧接	3.0
	常温圧接	3.0
	爆発圧接	2.3
	電磁圧接	1.5
	熱間圧接	1.5
	ガス圧接	4.5
	各種	3.8
	ボルト	1.5
機械的接合 (6.1%)	かしめ	0.8
	リベット	0.8
	各種	3.0
	接着剤 (10.6%)	10.6
その他 (4.3%)	4.3	

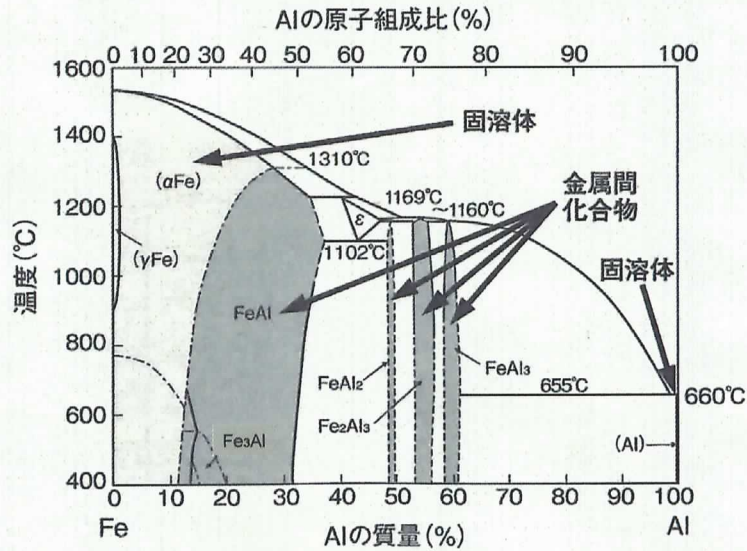
NEDO[異材溶接技術の基礎研究]NEDO-ITK-0009(2001.3),68.

# 平衡状態図から分かる異材溶接の可能性: 金属/金属



T.B.Massalski: Binary Alloy Phase Diagram, 2nd ed., ASM (1990)

# 鉄/アルミニウム2元系状態図



# 状態図と関連づけた異材溶接の可能性 (レーザー溶接)

	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



# 異材接合技術の現状

異材接合の組み合わせ:

第1世代: 同種金属(合金)

鉄鋼材料同士等

第2世代: 異種金属(合金)

鉄/非鉄(Al, Mg, Ti, Cu等)等

第3世代: 異種材料

金属/樹脂/セラミックス

未解決課題の  
解決とさらなる  
適用拡大

先進的、革新的な研究開発

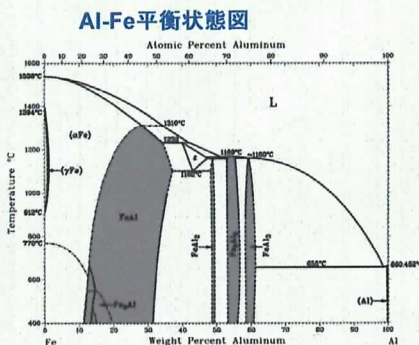
科学技術イノベーションが必要

第2世代: 異種金属(合金)

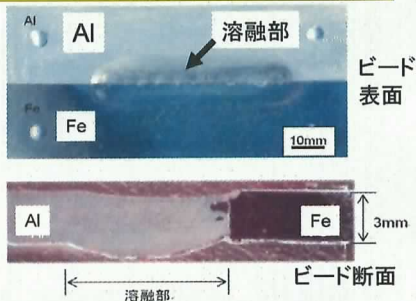
最もニーズの大きい組合せ:

・鉄鋼/アルミニウム合金

## アルミ/鉄異材継手の溶融溶接上の問題点



- ・Al/Fe界面での脆い化合物  $Al_3Fe$ ,  $Al_2Fe_5$  の優先析出
- ・融点差:  $1538^{\circ}C/660^{\circ}C$
- ・熱膨張係数差:  
 $12 \times 10^{-6} / 23 \times 10^{-6}$



対応法: 脆い化合物の形成防止は困難なので化合物層の厚さを薄くする方法が主として検討されている

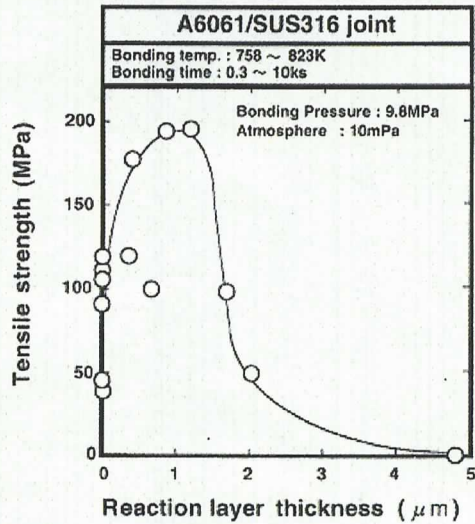
Al/Fe異材継手のティグアーク溶融形状

## Al/Fe異材接合プロセスと接合可能な界面構造

接合プロセス		接合界面構造
<p>熱的平衡(準平衡)</p> <p>高温反応</p>	<p>溶融溶接</p> <p>抵抗溶接</p> <p>ろう付</p> <p>拡散接合</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属間化合物層の厚さが支配因子</li> <li>・数 <math>\mu m</math> (<math>1 \mu m</math>) 以下で良好な継手強度</li> </ul>
<p>熱的非平衡</p> <p>低温反応</p> <p>塑性流動現象</p>	<p>圧接</p> <p>(摩擦圧接)</p> <p>超音波</p> <p>爆接</p> <p>FSW</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・金属間化合物層が認められない(光顕)</li> <li>・界面にアモルファス層形成 (数nm~数十nm厚さ)</li> <li>酸化物層?</li> </ul>



### 熱的平衡プロセス例(拡散接合の例)



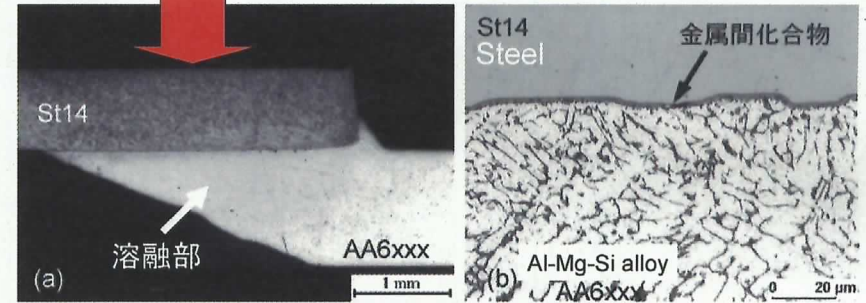
- ・金属間化合物層形成
- ・金属間化合物層厚さが継手強度の支配因子
- ・金属間化合物層厚さ 1~2 μm で最高強度
- ・これより薄いと低下 (接触面積)
- ・これより厚いと低下 (金属間化合物層内破断)

黒田ら; 溶接学会論文集, 17(1999),484

### 熱的平衡プロセス例:

### 鋼板へのYAGレーザー照射による間接加熱による重ね溶接

鋼板へのレーザー照射による加熱

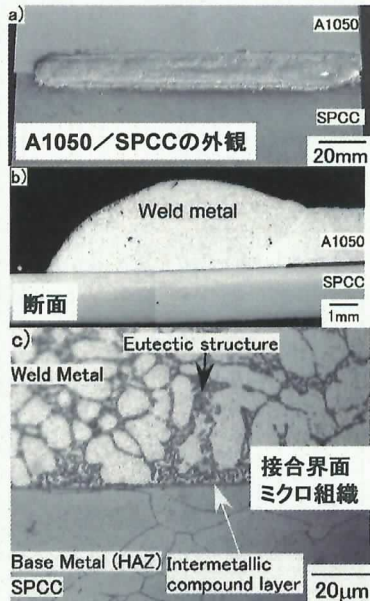


AA6xxx/St14継手の断面マクロ

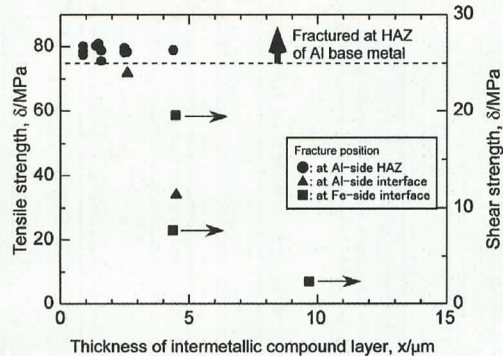
界面近傍のマイクロ組織

F.Wagner et al: Proc. ICALEO2001, C, 1301

### 熱的平衡プロセス例(ミグアークブレーズ溶接重ね継手)



A1050/SPCC  
 フラックス内蔵  
 溶加材ワイヤ  
 BA4047



1~3μm厚さでAl母材破断

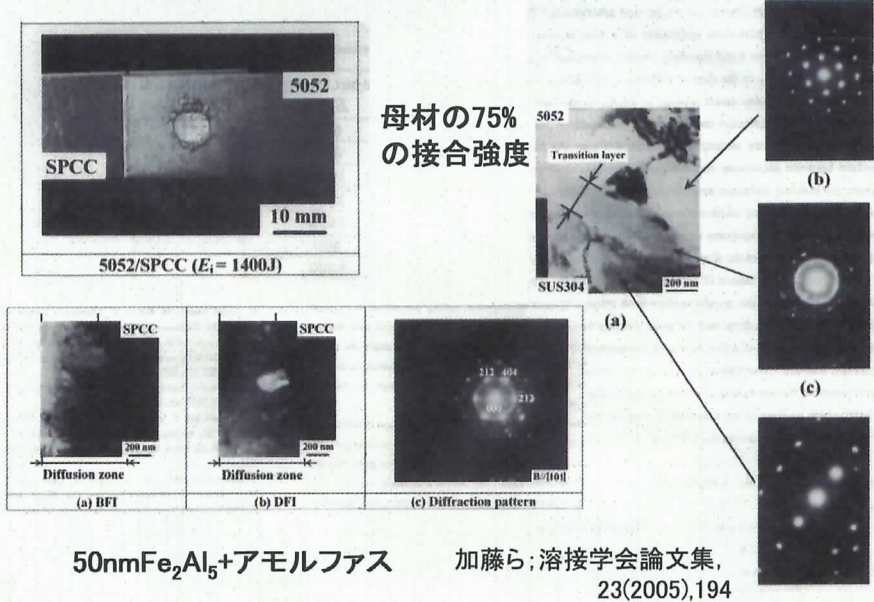
T.Murakami, K.Nakata et al: ISIJ Int.43(2003)1596.

### Al / Fe異材接合プロセスと接合可能な界面構造

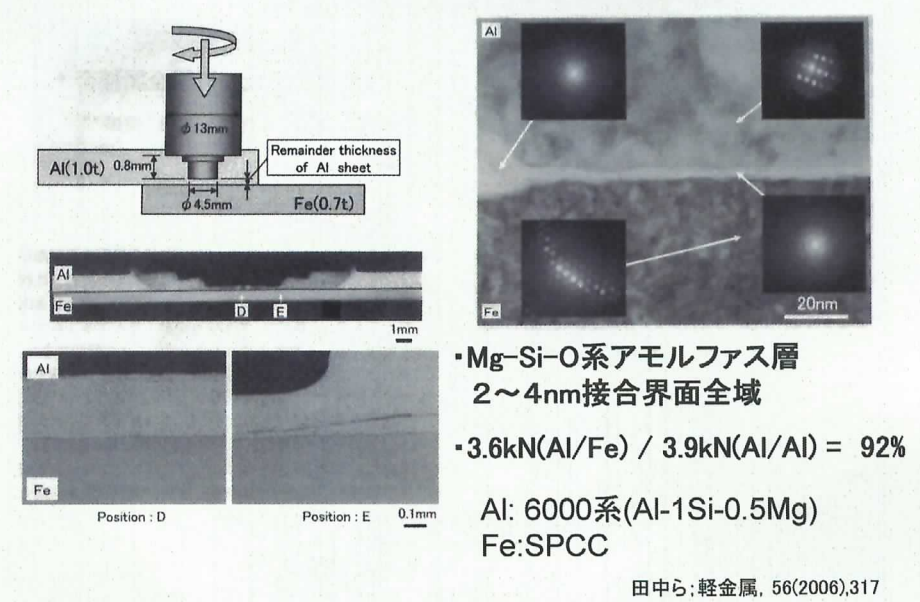
接合プロセス		接合界面構造
熱的平衡(準平衡)	溶融溶接 抵抗溶接 ろう付 拡散接合	・金属間化合物層の厚さが支配因子 ・数 μm (1 μm) 以下で良好な継手強度
熱的非平衡	圧接 (摩擦圧接 超音波 爆接) FSW	・金属間化合物層が認められない(光顕) ・界面にアモルファス層形成 (数nm~数十nm厚さ 酸化層?)



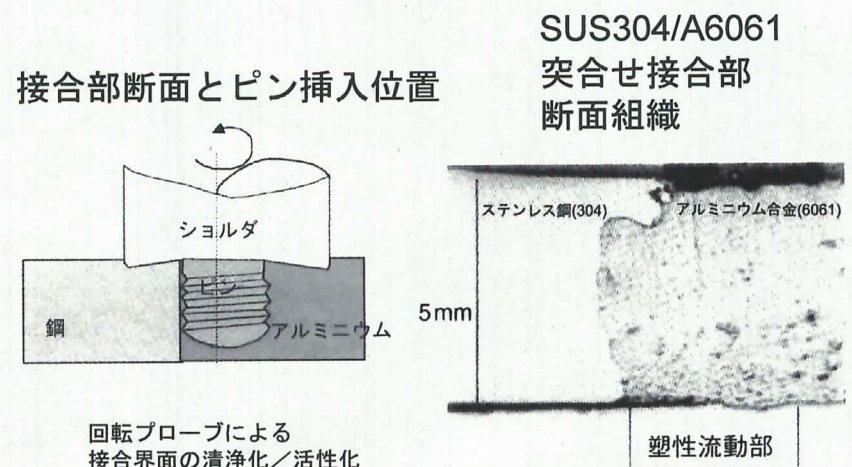
## 熱的非平衡プロセス例(超音波圧接)



## 熱的非平衡プロセス例(摩擦攪拌点接合)

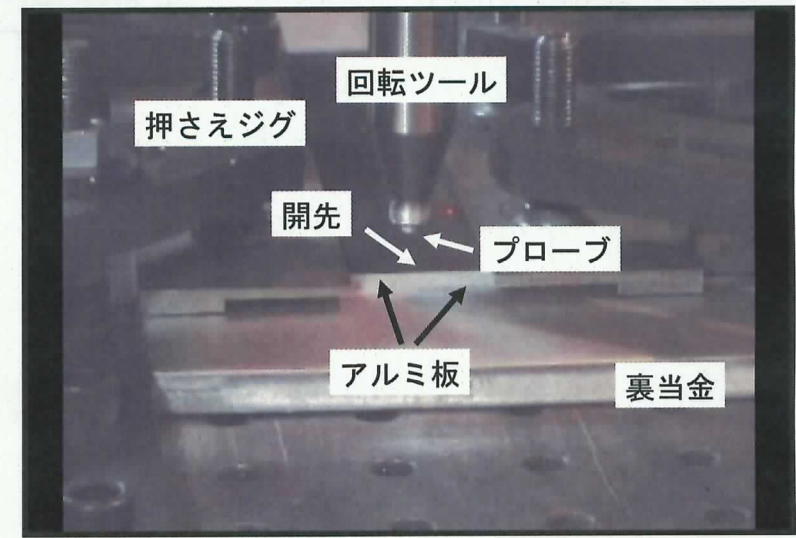


## 第2世代異種金属(合金)接合に効果的な 摩擦攪拌接合FSWによる異材接合法



各種金属間の異材接合の研究が実施されている

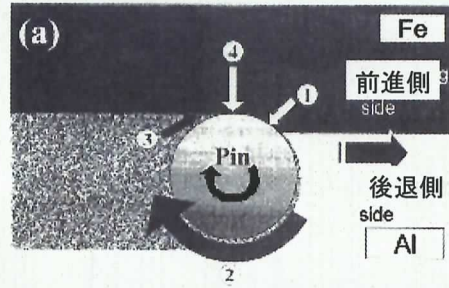
## FSW作動ビデオ



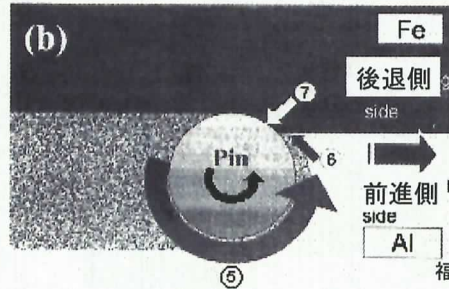
被接合材:アルミ合金板、板厚6mm



## 接合性に及ぼすピン回転方向と試片配置の組合せの影響



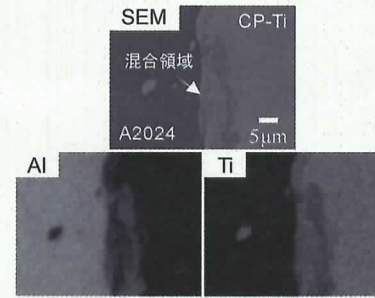
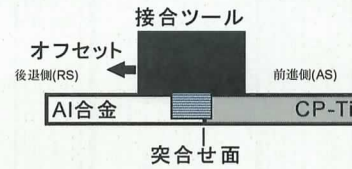
プローブに削られた  
清浄面に塑性流動  
アルミが押し付けられる



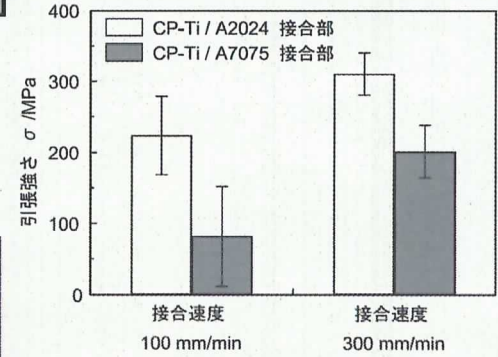
6の接合面は清浄では無い

福本ら：溶接学会論文集22(2004)309

## チタンとアルミニウム合金の異材接合：FSW突合せ継手

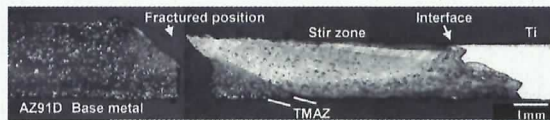
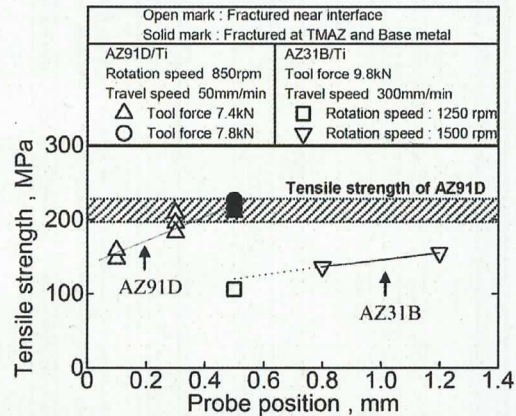
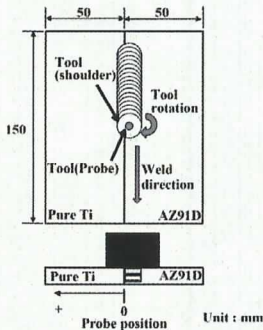


混合領域に金属間化合物TiAl3が形成



溶接入熱が多い条件（低接合速度）では  
金属間化合物層が厚く成長して継手強度低下

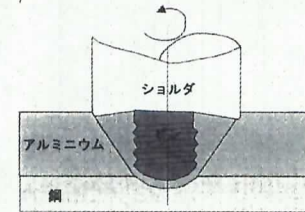
## チタンとマグネシウム合金のFSW異材接合



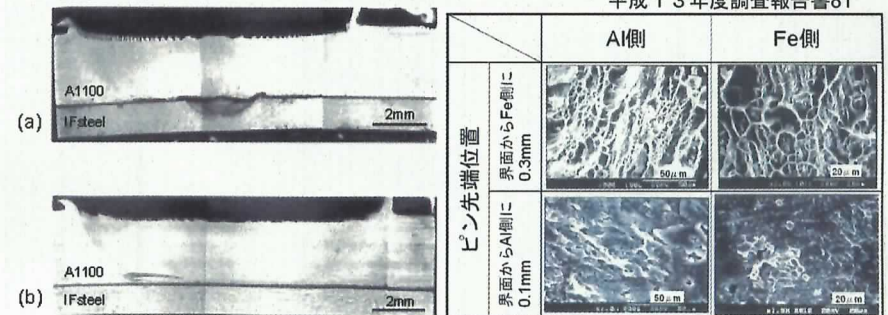
Mg合金を前進側  
Tiを前進側では  
Mgが発火する

青沼、中田他：鑄造工学、80（2008）No.4,219-224

## FSWによる鉄鋼とAl合金の異材重ね継手形成



岡本ら：軽金属溶接 42(2004)49.



(財)宇宙環境利用推進センター：  
平成13年度調査報告書81



## 鋼板とAl合金のFSW異材接合 実用化例:ホンダ

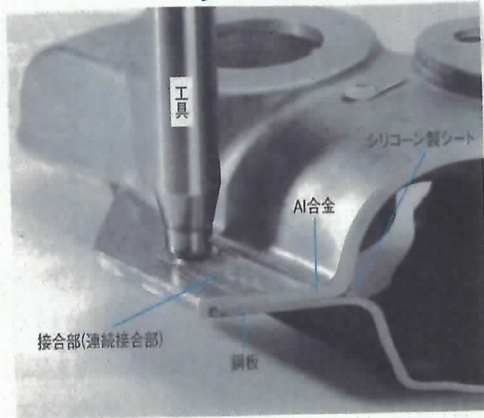


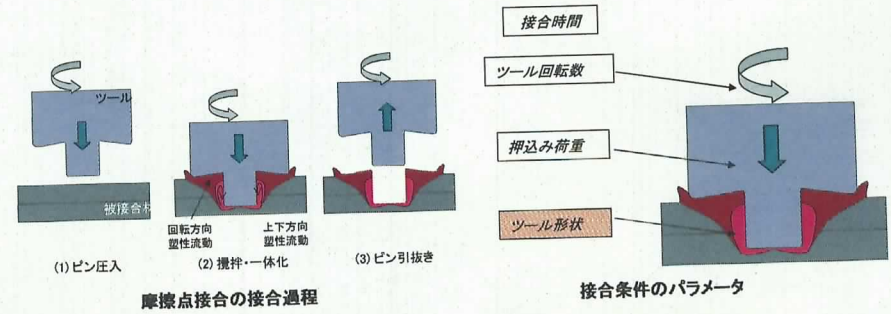
図2●工具と接合部  
電食防止用のシリコン製シートを挟んで鋼板の上にAl合金を重ねて固定する。ここに、Al合金に高速回転する工具を押し付け、かつ直線的に工具を移動させていく。プローブはAl合金内に埋まっいて見えない。これにより連続接合となり、MIG溶接と同等以上の強固な接合力が得られる。接合部は合計10箇所。

## 重ね継手 への展開

日経ものづくり  
2012年10月p18-19

## 摩擦攪拌点接合:FSJ,FSSW

1. アルミ合金の抵抗スポット溶接の代替
2. 高張力鋼シート材の抵抗スポット溶接の代替
3. アルミ合金/鉄鋼シート材の重ね異材接合



技術開発の動向に注意を払う必要あり

## 摩擦攪拌点接合:動画

アルミ合金シート材の重ねスポット接合



## 第3世代異種材料接合: 接着剤を用いない金属/樹脂の直接接合



金属SUS304板と樹脂PET板とのレーザー照射による直接接合法(LAMP接合)による異材接合継手(片山、川人;接合科学研究所)

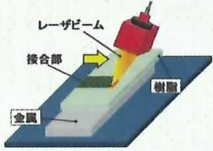
CFRPと金属との接合への展開



# 金属と樹脂との直接接合を可能にする新レーザー接合法の創出

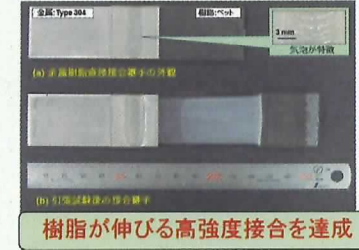
大阪大学接合科学研究所 片山教授・川人准教授

## ■ 接合プロセス



金属と樹脂を重ね、レーザー照射し、接合界面でナノレベル反応層を形成することで接合する革新的な接合プロセス

## ■ 接合継手(引張試験評価)

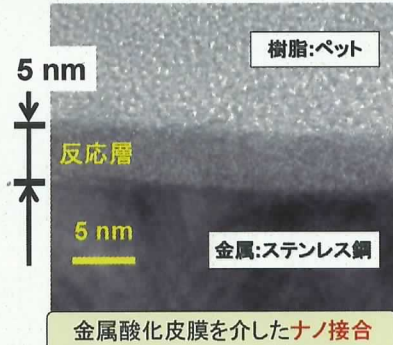


樹脂が伸びる高強度接合を達成

## ■ 期待される成果

日本の成長分野: 電気自動車の軽量ボディ、蓄電池などの次世代ものづくりを支えるキーテクノロジー

## ■ 接合界面(透過型電子顕微鏡観察)

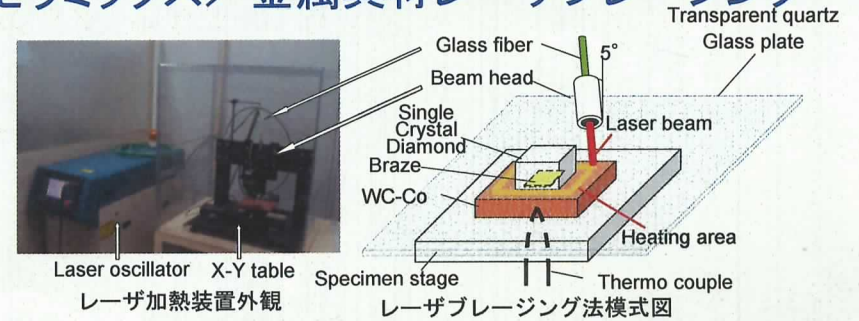


※本研究成果は、朝日新聞、日刊工業新聞等の10社以上に掲載(2006年)



樹脂を用いた軽量EV車

# セラミックス/金属異材レーザーブレイジング

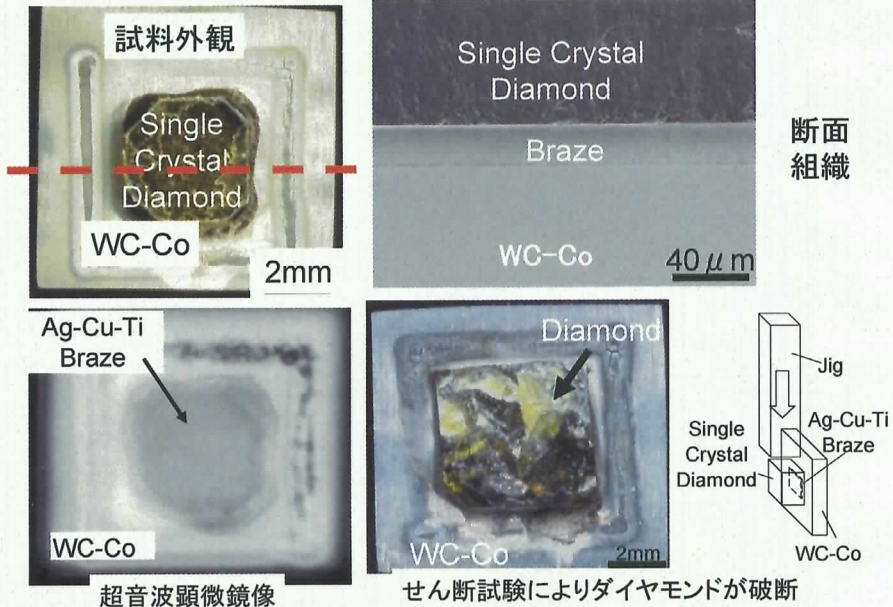


## レーザーブレイジング条件

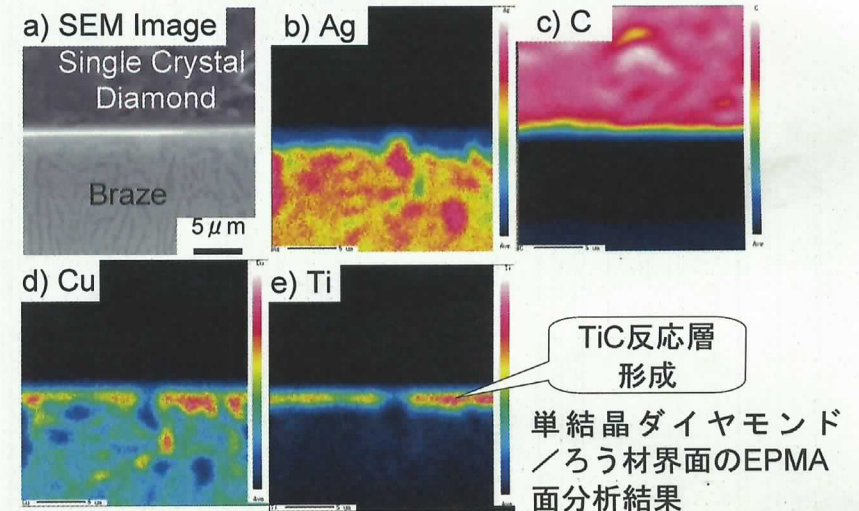
Pulsed YAG average output : 0.134 kW  
 CW LD output : 0.02 kW  
 Pulse frequency : 100 Hz  
 Scanning speed : 0.6-1.0mm/s  
 Atmosphere : Ar (1atm)

活性金属ろう:  
 (70%Ag-28%Cu-1.68%Ti)  
 厚さ 0.1mm t

## 単結晶ダイヤモンド/ろう材の接合界面



## ダイヤモンド/ろう材界面の元素分析



cBN、サイアロン、アルミナ、SiC、黒鉛の接合可能



# 異材接合の今後の展開

新しい視点からの取り組み:

- ・可逆接合
- ・常温接合

合成樹脂で人工的にかぎ状フックとループを再現:  
面ファスナー、マジックテープ



絡み合った様子

フック面

ループ面



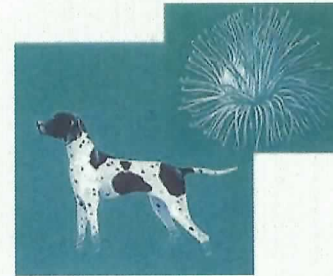
からんでいるようす



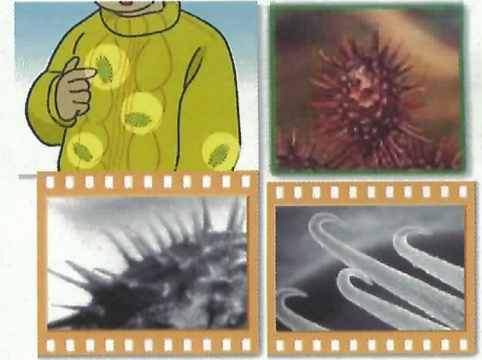
トゲトゲのある面

## 脱着可能な可逆的接合: 自然界が教えてくれた魔法のテープ

1948年スイス、ジョルジュ・デ・メストラルが狩猟時に自分の服や犬の毛に付着した野生ゴボウの実を顕微鏡で調べてその実には無数の鉤があり、その鉤が衣服や犬の毛にしっかりと絡みついていたことにヒントを得て、この構造を応用して着脱自由自在の魔法のファスナー(面ファスナー、マジックテープ)を特殊ナイロン糸を使用して、発明。



バイオミメティクス

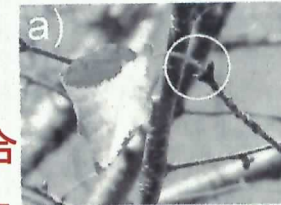


## 落葉

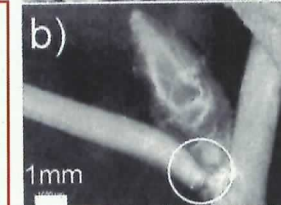
分離が容易な接合

落葉の機構:

- ①あらかじめ離層を準備している
- ②離層が薄い場合は高い接合強度
- ③環境変化で離層が成長
- ④離層が厚くなると自然に分離、離脱



a)ヤマザクラの葉と枝



b)葉柄と枝の接合部の拡大図



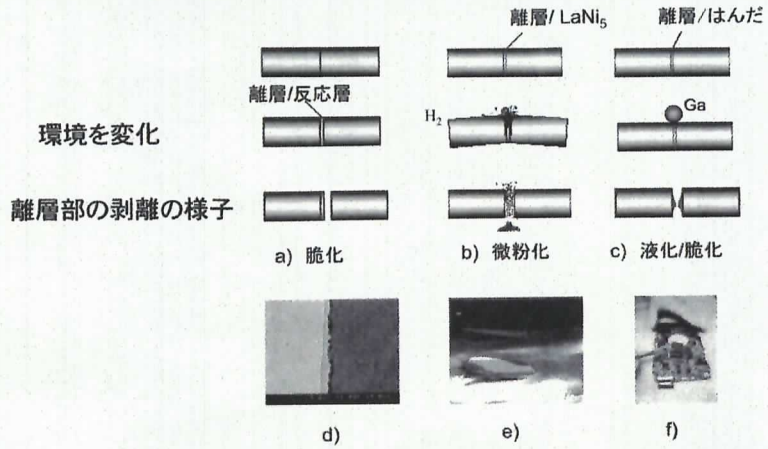
c)葉柄と茎の接続部の断面

離層

バイオミメティクス



# 可逆的接合への応用案



離層のタイプと剥がれるしくみ。a) は加熱により脆い反応層を成長させるタイプ。b) は水素と反応して微粉化するタイプ。c) は液体金属と接すると融解しないしは脆化するタイプの離層の例。d) アルミニウムとステンレス鋼が離層で剥がれる様子。e) 多層膜 (ガラスエポキシ基板上に銅/離層 (LaNi<sub>5</sub>) / 銅/はんだ) 構造を作製し、水素雰囲気中で離層部が剥離した様子。f) はんだ (離層) にガリウムを塗り液化/脆化により使用済みプリント回路からチップを取り出しているところ。

細田: 溶接学会誌、78 (2009年) 3, 191-194

## 常温接合: 加熱せず、変形を伴わず

- ・磁石 (電磁石): 可逆接合
- ・陽極接合: 金属/ガラス
- ・電磁圧接: 金属同士
- ・接着剤: 可逆接合

ガラス中のNaイオンなどの静電引力を利用

パルス大電流により衝撃的に発生するローレンツ力を利用

## 常温接合: 接合面の清浄化、酸化皮膜・吸着物質の除去

### # 半導体デバイス関係

・イオンビーム表面活性化処理 + 高真空雰囲気中

### # 構造材料への適用は?: 大気中での処理は?

・超音波接合: 金属/金属

・大気圧非平衡プラズマによる表面活性化

(コロナ放電 → 大気圧グロー放電プラズマ?)

まだまだ検討の余地あり → **常識の壁を打ち破れ!!**

ご静聴有難うございました