

## 第19回講演会(WEB開催) アルミ車両 技術と情報



Aluminum lightens the world  
アルミでかなえる、軽やかな世界

2022年7月14日  
14:30~15:10

# 軽金属異種材料の接合技術の紹介

# Introduction of joining technology for light metal dissimilar materials

株式会社UACJ R&amp;Dセンター

○森 久史※、箕田正、加藤勝也、田中宏樹、米光 誠

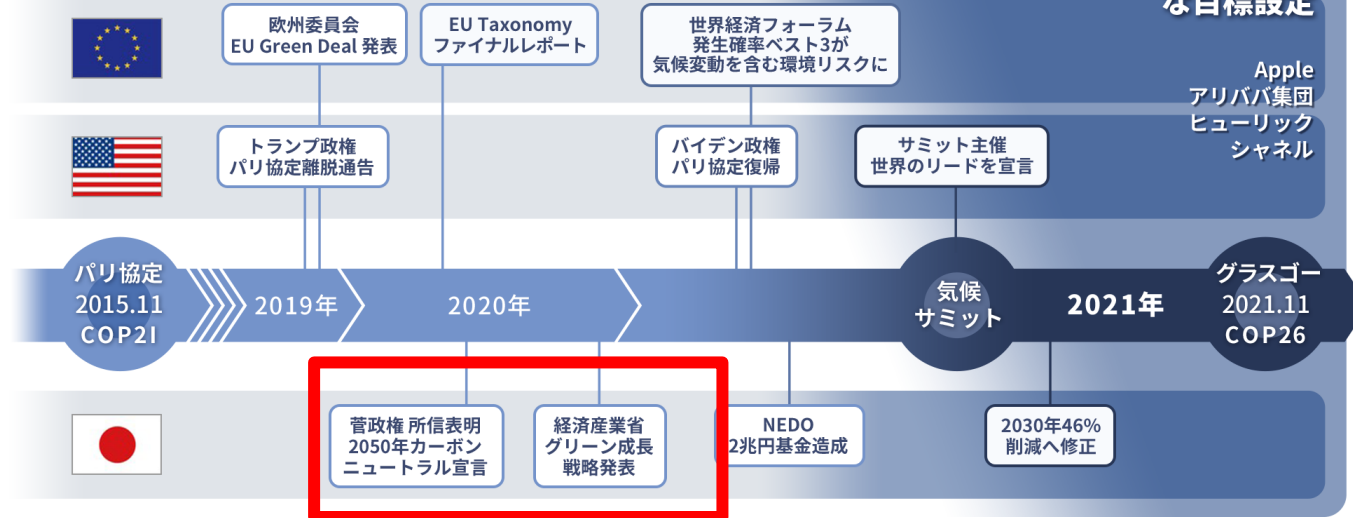
※第一研究部 押出鑄鍛厚板研究室 主幹



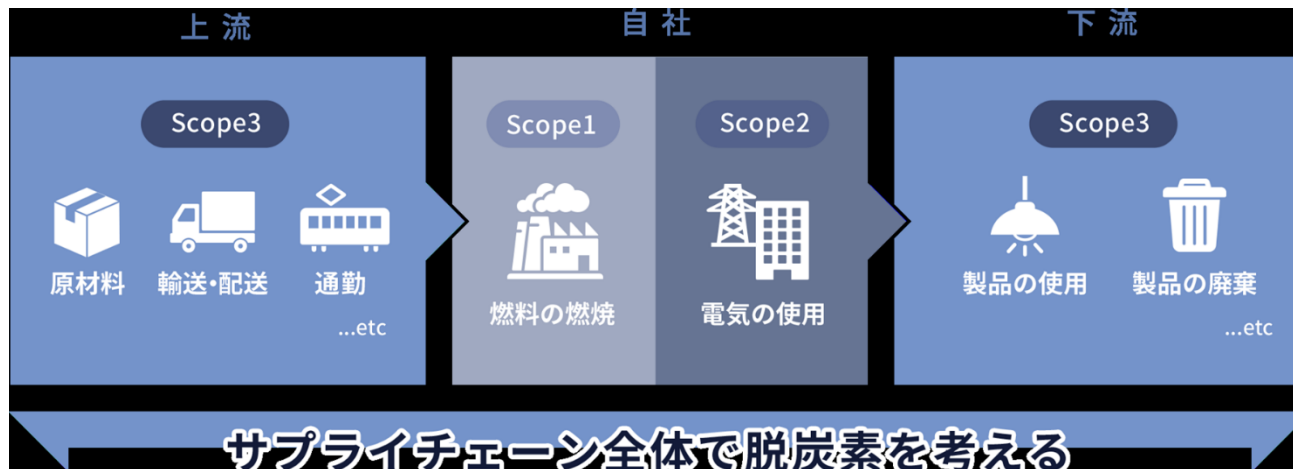
# カーボンニュートラルに向けた産業政策

2021年からグローバルで一気に対応が加速

世界中で野心的な目標設定



日本政府は2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言

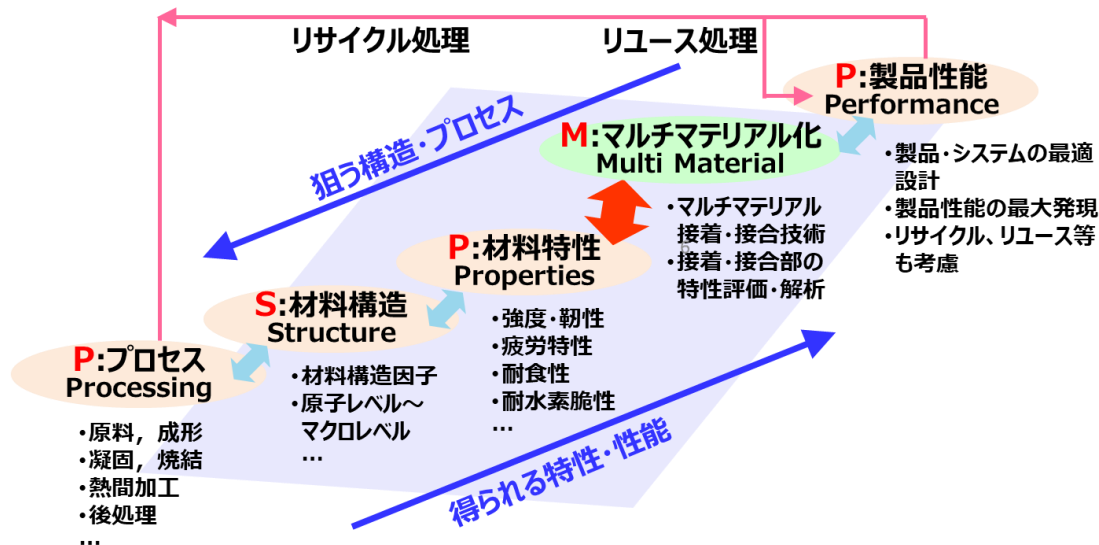


参考: NTT  
Data通信  
HPより

# カーボンリサイクル・マテリアル産業(自動車・鉄道)

- 交通や移動にかかる時間等のコストを大きく低減する。
- 革新的金属素材による軽量化により、輸送機器の高速化が実現。
- 将来的な高速輸送機器に使用する部材として社会実装としての目標値を盛り込むなど、社会実装の在り方についても留意し、研究開発を実施。
- 強度や靱性等を更に高めた高強度鋼材により、地震等に強いだけでなく、構造物の長寿命化も実現。さらにマテリアルリサイクルの推進、希少金属使用からの脱却等

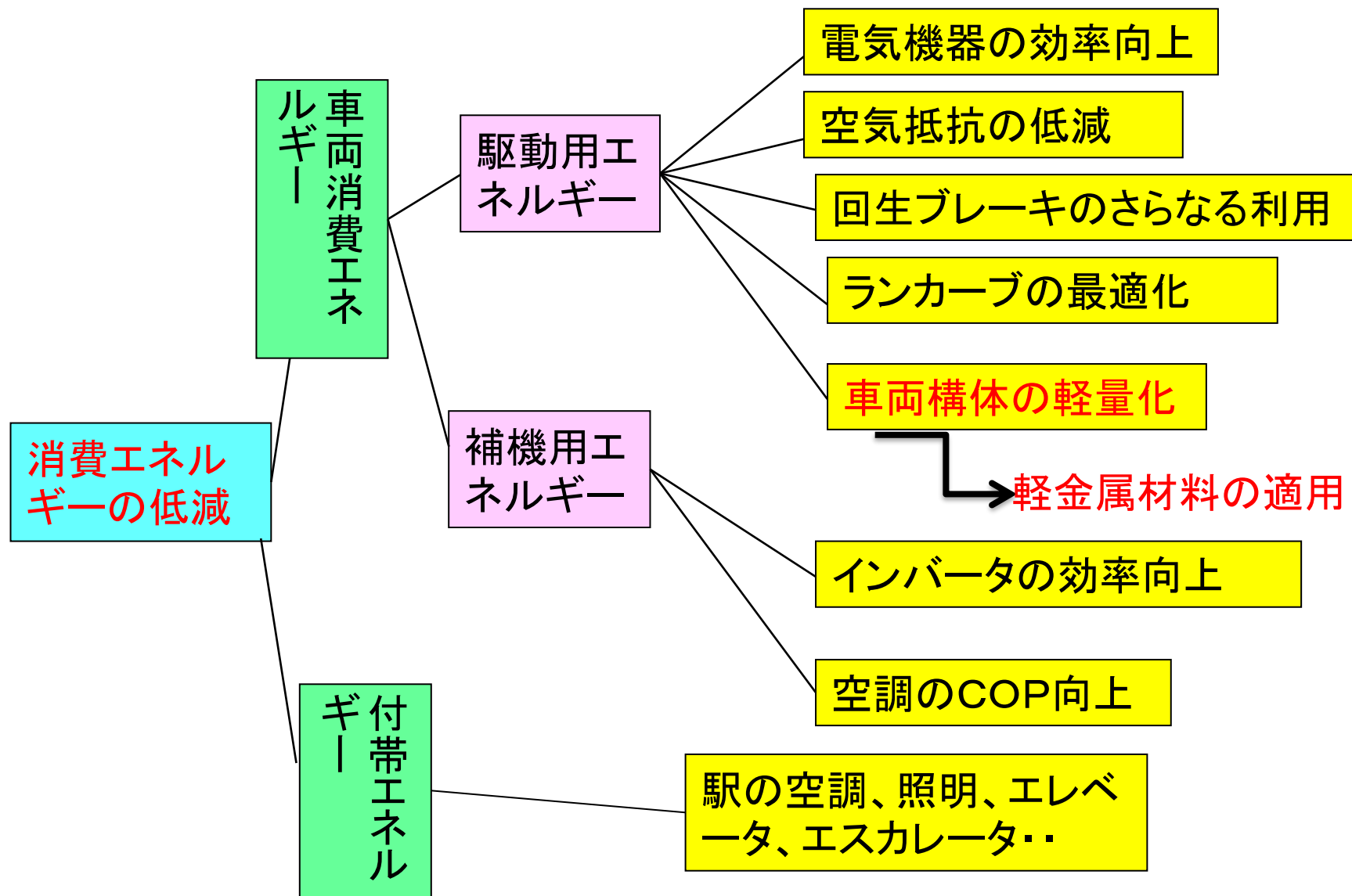
P:プロセス (リサイクルを含む) → S:材料構造 → P:材料特性 → M:マルチマテリアル化 → P:製品性能に至るPSPMPの過程の因果関係を体系的に解明



求められる“P:製品性能”から、“M:マルチマテリアル化”、“P:材料特性”、“S:材料構造”、“P:プロセス”の最適アプローチを狙う。

参考:AIST  
千野氏資料

# 鉄道車両の省エネルギー化



# 軽量化技術の適用による車体重量軽減(自動車)

Sources of weight are from three categories:

*Direct weight savings with lightweight materials*

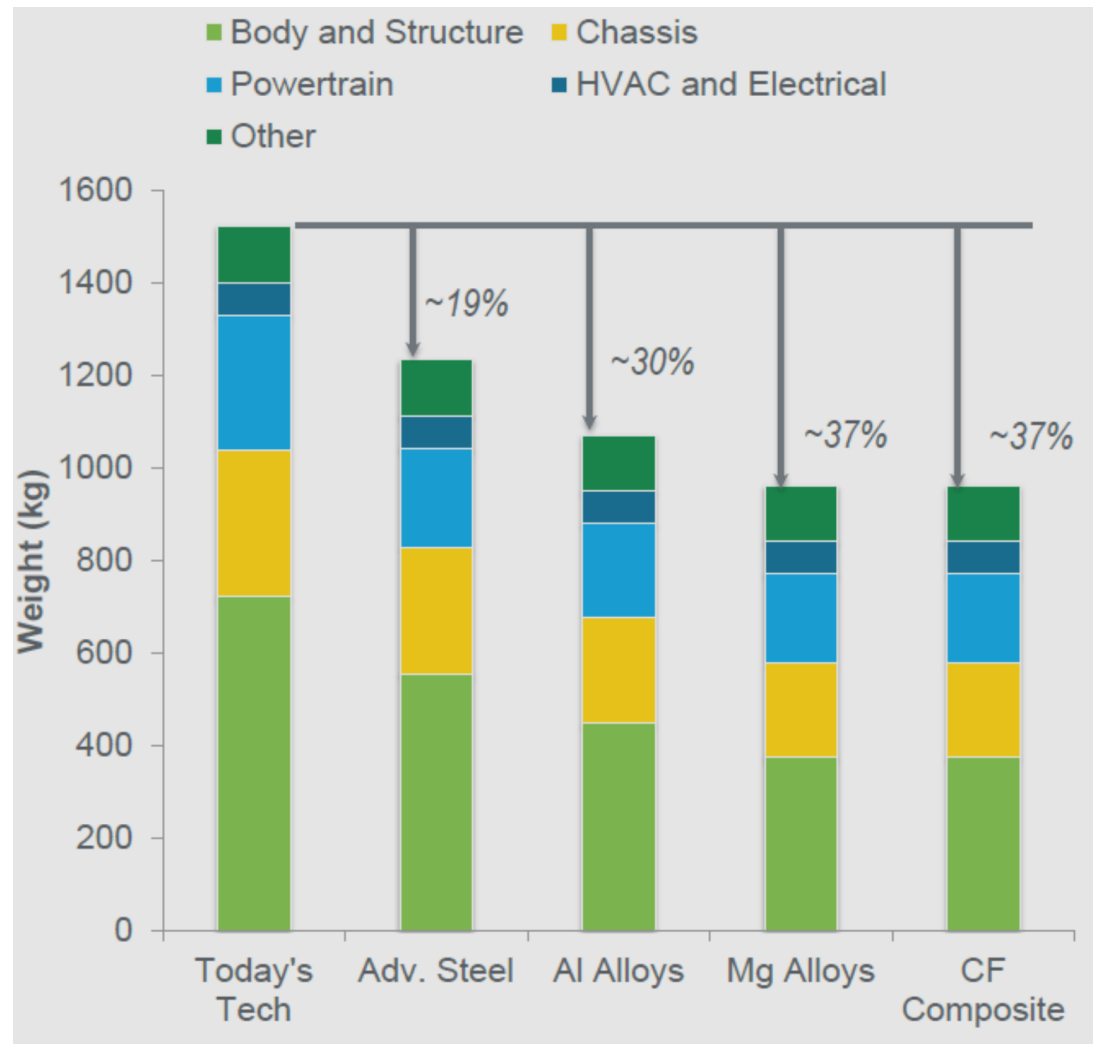
- *Body & Structure, parts of Chassis and Powertrain*

*Indirect weight savings by reducing requirements*

- *Lighter vehicle can use lighter brakes, lighter suspension, etc.*
- *“Mass Decomponding”*
- *Powertrain and Chassis*

*No significant savings through lightweighting*

- *Many systems are essentially a function of vehicle volume*
- *Windshield, wiring, head lights, HVAC, etc.*



# これからの必要技術

## 信頼性設計ツール技術

- 下記の技術の融合により、PSPMP関係をマルチスケールで体系化し、信頼性設計ツールを構築

## マルチマテリアル接着・接合技術\*

- マルチマテリアルに対応する接着・接合技術
- 接着・接合部の特性評価解析・信頼保証

## 実環境・実部材信頼性評価\*

- 実環境・実部材での長期信頼性評価手法の適正化
- 信頼性設計データベースの構築

## 最先端構造解析技術\*

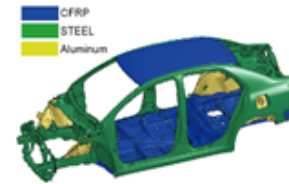
- 原子レベルからの材料構造の微視的解析・評価技術の高度化
- 製造工程の精緻・迅速・その場観察手法確立

## 計算材料科学活用

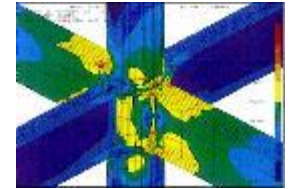
- マルチスケール、トポロジー最適化等、各種シミュレーション手法の高度化
- 順方向・逆方向シミュレーション手法の開発とAIの活用

## 製品LCA技術\*

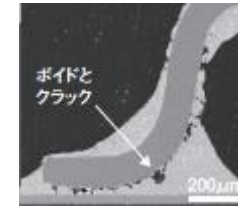
- 製品ライフサイクルにおける価値・性能を検討
- 最小環境負荷で最大性能を引き出す設計手法の導出



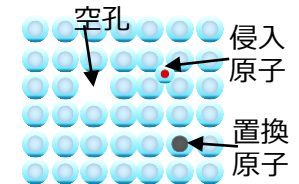
接着部評価解析



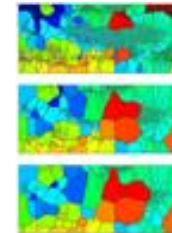
接合部応力解析



内部構造の  
非破壊可視化



原子レベルでの  
欠陥評価



粒成長シミュレーション

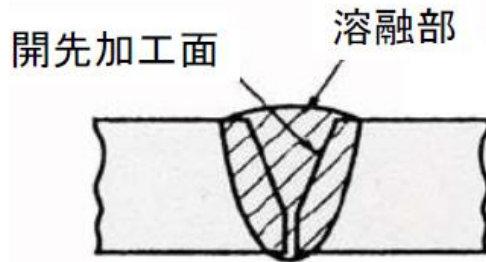


LCA解析

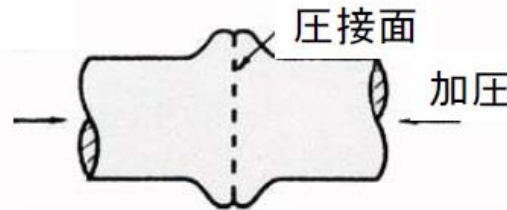
参考:AIST  
千野氏資料



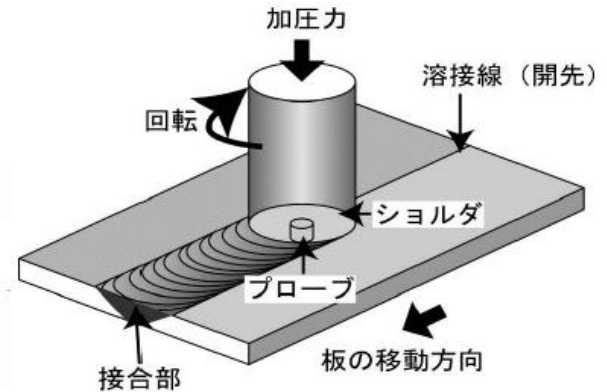
# 溶接・接合方法



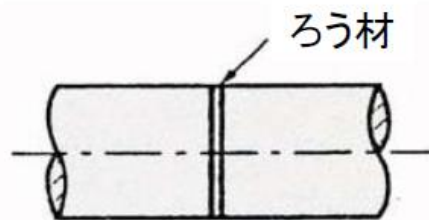
(a) 溶融溶接法  
(アーク溶接の例)



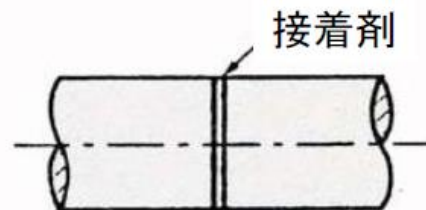
(b) 圧接法  
(摩擦圧接法の例)



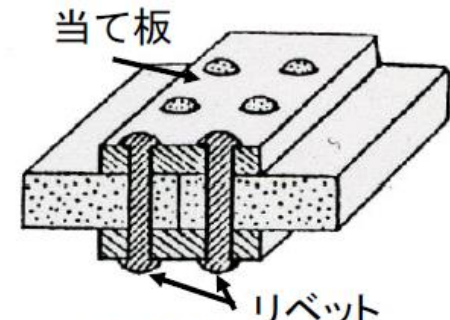
(c) 圧接法  
(摩擦攪拌接合法の例)



(d) ろう接法



(e) 接着剤



参考: 大阪大学  
中田先生資料

# 異種材接合に対する溶接プロセス方法

接合 プロセス	特 性						
	プロセス温度	母材溶融状況	処理時間	母材の物理的 性質の影響	適用異材組合せ	継手形状・サ イズの自由度	継手組成制御
溶融溶接	高温 母材融点以上	母材溶融	短い	大	金属／金属	大	一般に困難 但し、プロセスによる
ろう付	低温～中温 母材融点以下	母材非溶融 ろう材のみ溶融	長い (炉中ろう 付)	小	金属／金属 金属／セラミックス 金属／複合材	中	容易 (ろう材)
固相接合	低温～中温 母材融点以下	母材非溶融	拡散：長い 圧接：短い	小	金属／金属 金属／セラミックス 金属／複合材	小	容易
接着	低温 母材融点以下	母材非溶融	短い	無し	全て可	大	容易 (接着剤)
機械的 接合	低温 非加熱	母材非溶融	短い	無し	金属／金属	小	容易 (リベット等)

参考：大阪大学  
中田先生資料



## 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(AI, 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

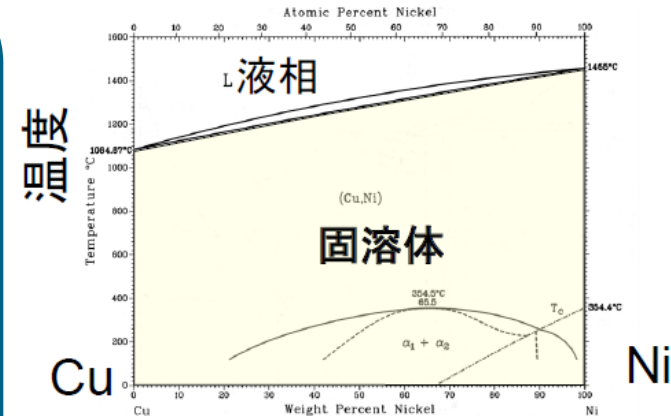
斬新なアイデア、先進的・革新的な研究開発

# 異種材接合の可能性の評価(熔融溶接)

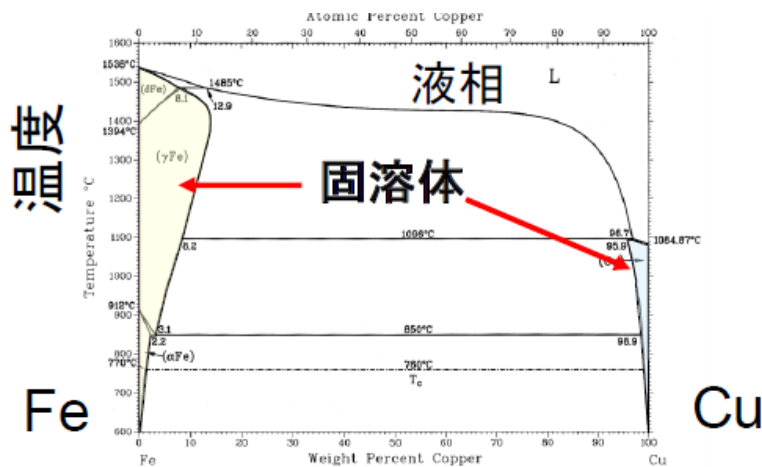
接合間の金属材料の間に、**脆い金属間化合物が形成するかがカギ。**

## 金属材料の状態図のタイプ

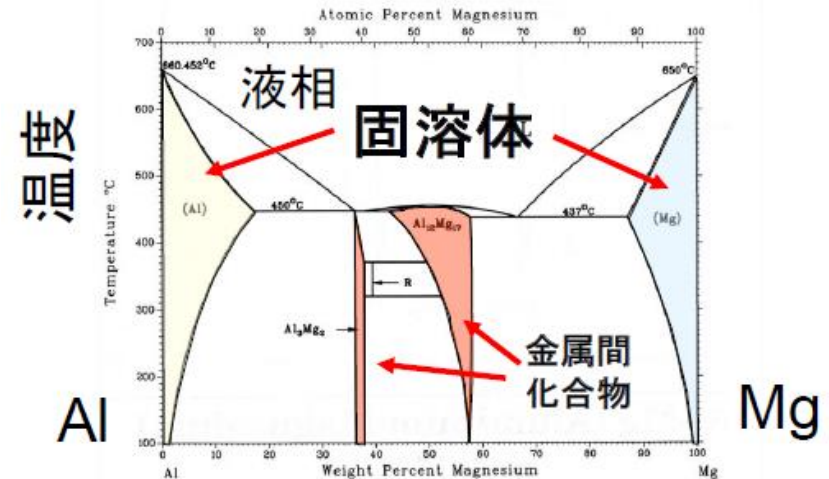
1. 全率固溶体を形成するタイプ (状態図A) (Cu-Ni)
2. 相が2相分離し、室温近くで析出相が若干認められる (状態図B) (Fe-Cu)
3. 初相は固溶体を形成するが、第2相濃度とともに金属間化合物が形成する (状態図C) (Al-Mg)



状態図A



状態図B



状態図C

# 異種材接合(対アルミニウム合金との溶接)

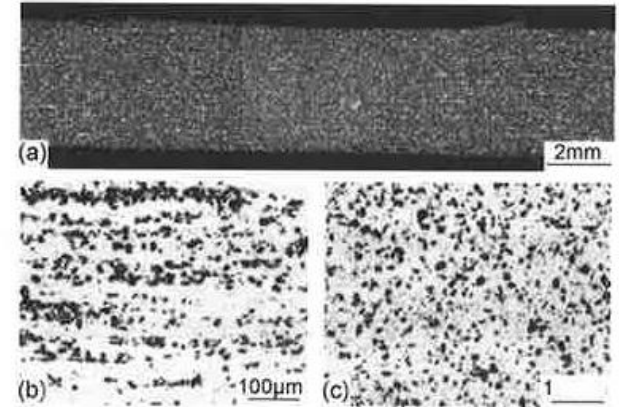
## (1) ダイキャスト・チクソモールド・鋳物材

これら材料では材料内に必然的に内包されたガスに溶接部にブローホールや空隙が発生、内圧ガス量やガス圧によっては溶融溶接は困難。この接合ではFSWが有利

## (2) 金属基複合材料

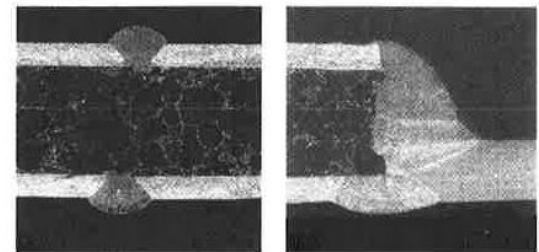
金属基複合材料の溶接は。強化材の分解による気孔、空洞の発生、強化剤の凝集による劣化

→FSWが適している。(強化粒子の種類によってはツールピンの摩耗が著しくなる



## (3) 発泡材料・ポーラス材料・ハニカムパネル

これらの材料は基本的にサンドイッチ材等として介した間接的な溶接方法で組み立てる必要がある。



# 異種材接合(対アルミニウム合金との溶接)

## (4) 超微細粒材

微細化した結晶粒のスケールサイズを維持するために、溶接部及びその近傍の粗大化をいかに制御するかが課題→レーザー溶接・電子ビーム溶接。

## (5) 高窒素ステンレス鋼

耐食性・機械強度の向上かでは、Nを0.3～1.0%含んだ高窒素ステンレス鋼が注目されていた。ただし、溶接では、一般的なステンレスと同様、ブローホール、割れ、クロム系炭化物の特性劣化が考えられており、摩擦圧接のような圧接の適用が好ましいと推奨されている。

## (6) アモルファス金属

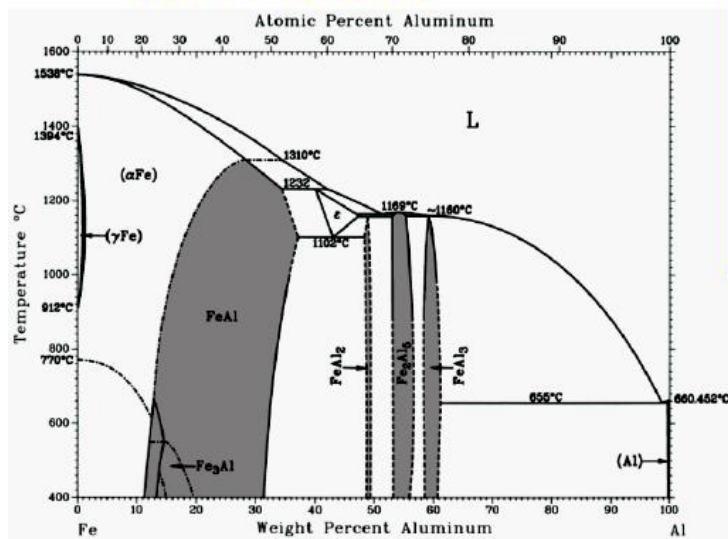
アモルファス化の高いアモルファス金属では、摩擦圧接、爆着圧接。レーザービーム溶接などで、結晶化させることなく、良好な溶接金属が得られることが示されている。

以上

出典 中田一博：溶接学会誌、72、1(2003)、12－15.

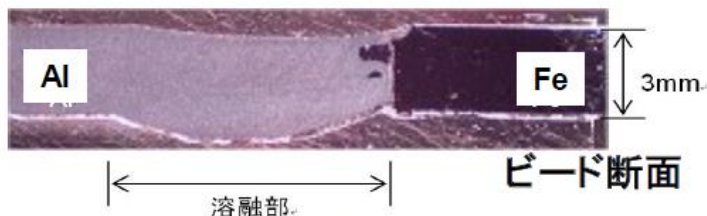
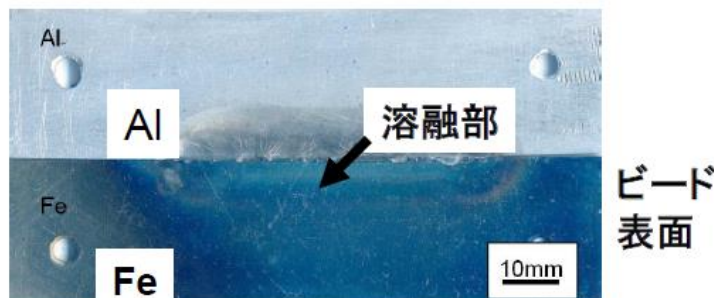
# Al/Fe の接合 (TIGアーク溶接)

Al-Fe平衡状態図



- ・Al/Fe界面での脆い化合物 Al<sub>3</sub>Fe, Al<sub>2</sub>Fe<sub>5</sub> の優先析出
- ・融点差: 1538°C/660°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

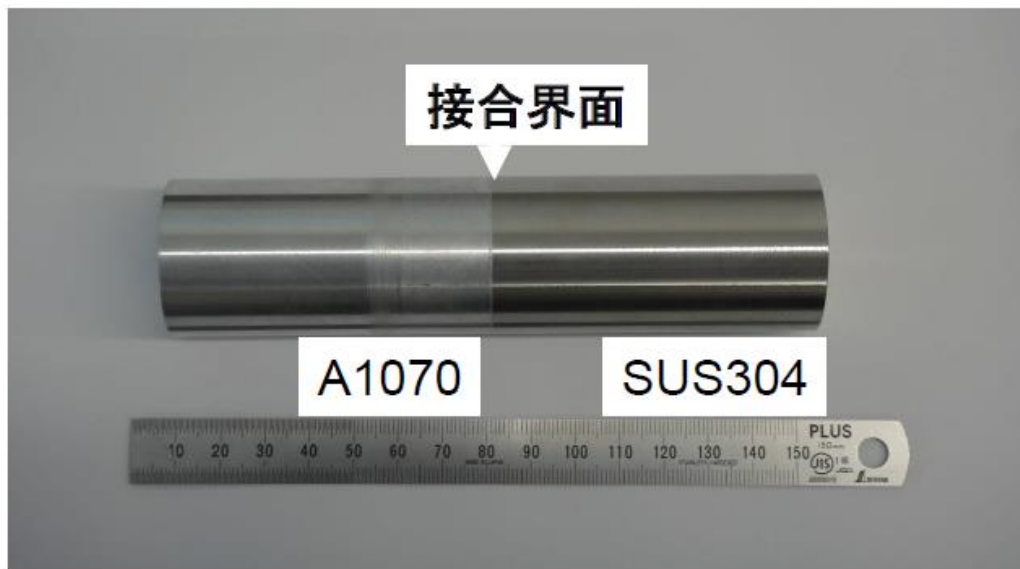


Al / Fe異材継手のティグアーク溶融形状

出典：中田一博 発表資料 (2016年)



# Al/Fe の接合(摩擦圧接)



直径24mm丸棒、  
A1070／SUS304  
摩擦圧接後  
表面機械加工

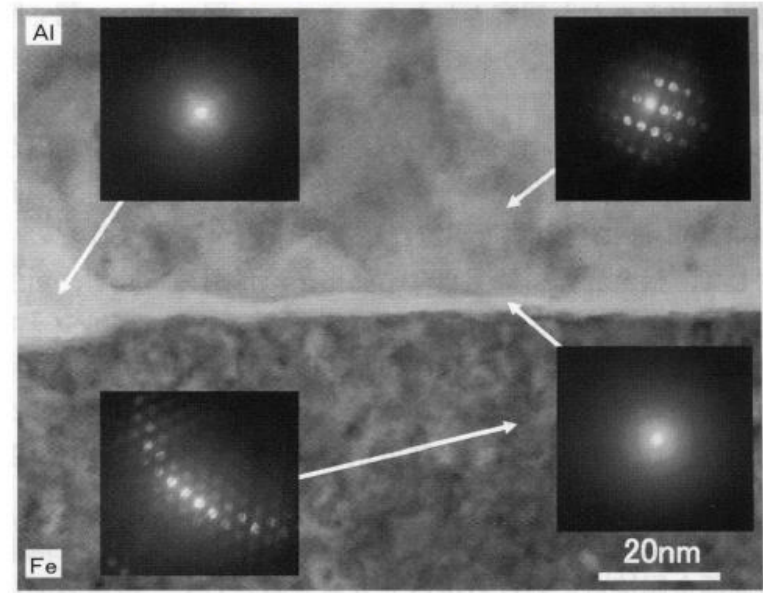
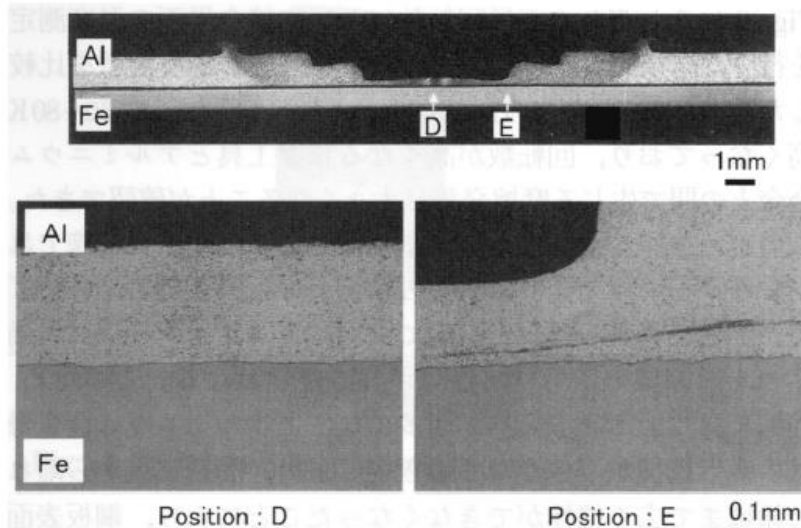
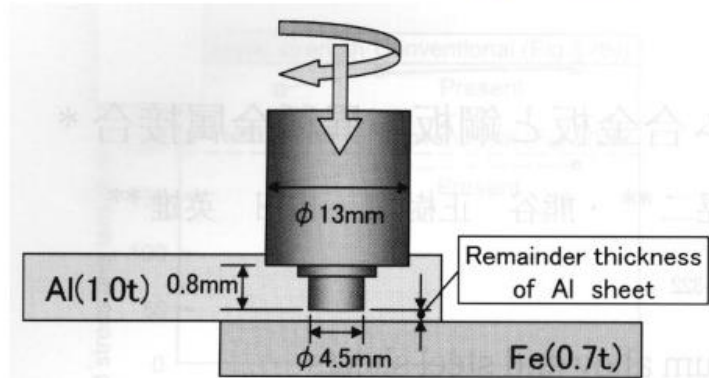


繰返し90度曲げ  
アルミ母材部破断  
(精密工業(株)提供)

参考:大阪大学  
中田先生資料



# Al/Fe の接合 (FSW)



- Mg-Si-O系アモルファス層  
2~4nm接合界面全域
- $3.6\text{kN(Al/Fe)} / 3.9\text{kN(Al/Al)} = 92\%$

Al: 6000系合金(Al-1Si-0.5Mg)  
Fe: 炭素鋼SPCC

田中ら; 軽金属, 56(2006), 317

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"><li>・高温反応のため金属間化合物層形成</li><li>・金属間化合物層の厚さが支配因子</li><li>・数 <math>\mu\text{m}</math> (<math>1\mu\text{m}</math>) 以下で良好な継手強度</li></ul>
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"><li>・金属間化合物層がSEM程度では認められない</li><li>・界面にアモルファス層形成 (数nm～数十nm厚さ, 酸化物層)</li><li>・化合物との複合層</li></ul>

部材軽量化

→Al/ Mgの異種材接合に期待 (状態図上では難しい)

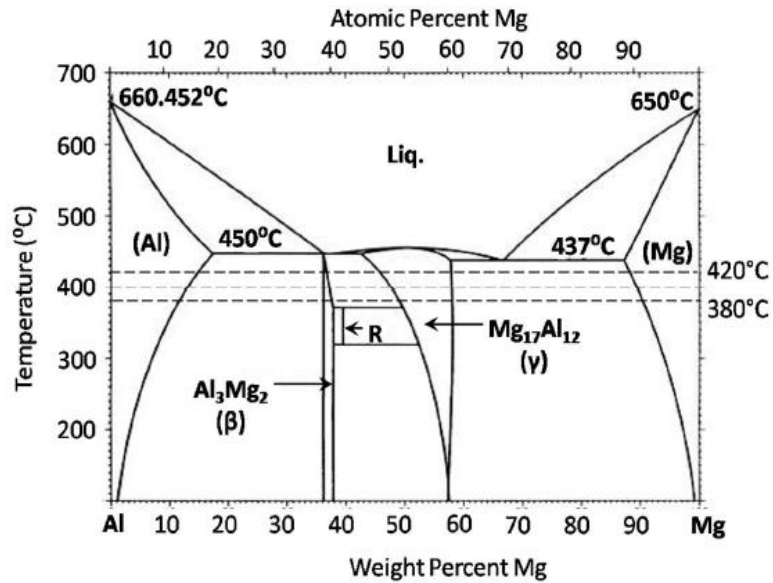
→金属間化合物のため

# Al/Mgの異種材接合(物性差)

物性値	単位	マグネシウム	アルミニウム
密度(20℃)	Mg/m <sup>3</sup>	1.74	2.7
融点	℃	651	660
沸点	℃	1107	2056
表面張力	mN/m	559	914
比熱(20℃)	J/kg・K	1022	900
熱容量(20℃)	J/m <sup>3</sup> ・K	1778	2430
熱膨張率	10 <sup>-6</sup> /K	26.1	23.9
熱伝導率 (20℃)	W/m・K	167	238
電気抵抗率 (20℃)	10 <sup>-8</sup> Ω・m	4.2	2.67
ヤング率	GPa	44	75

# 異種材接合の可能性の評価(溶融溶接)

## 状態図(C)



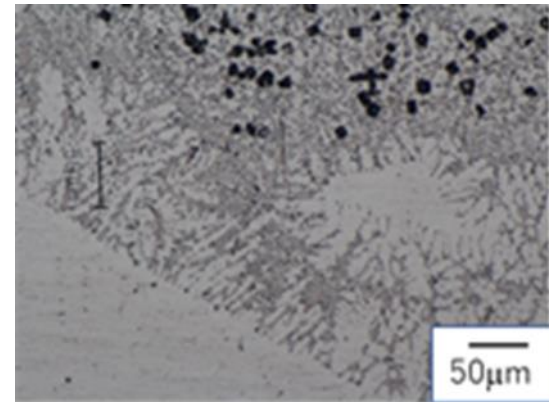
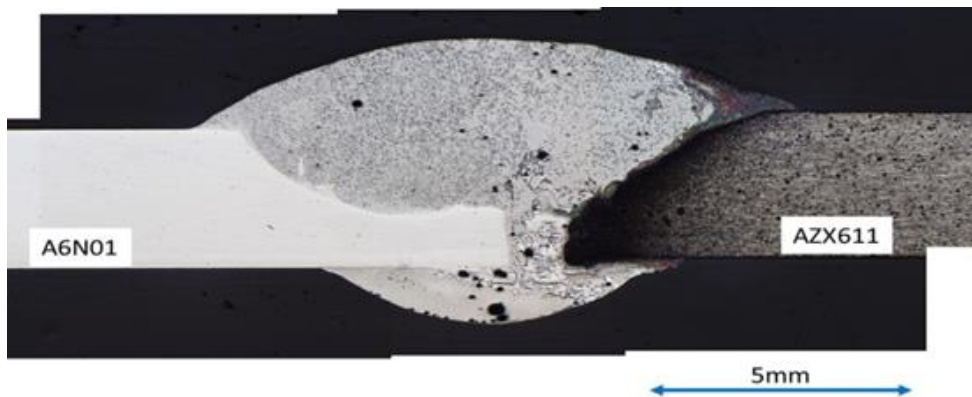
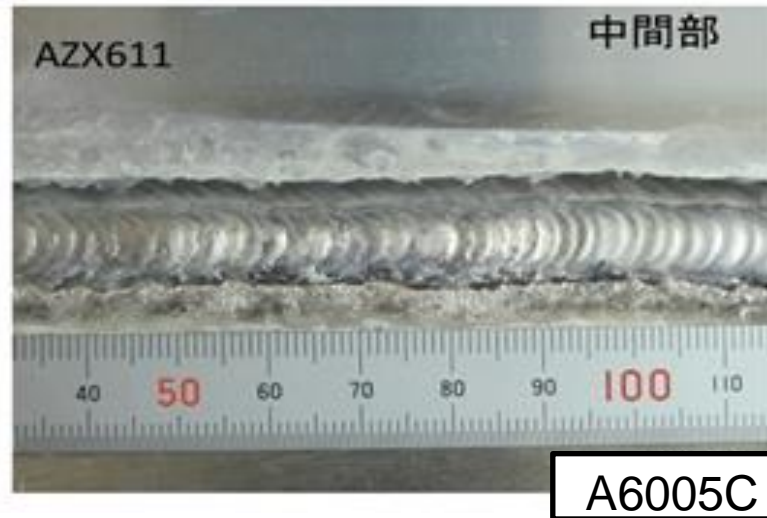
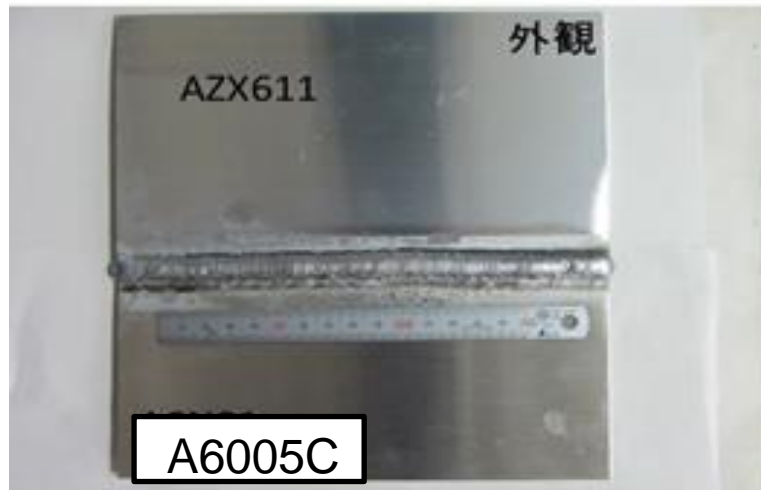
Al中にMgが最大で18.9at% (450°C)

Mg中にAlが最大で11.8at% (437°C)

中間層として、  
 $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  phase ( $\beta$  相) や  
 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$  phase ( $\gamma$  相) が認められる。

アーク溶接材、摩擦攪拌接合材の接合強度に強く影響を及ぼす。

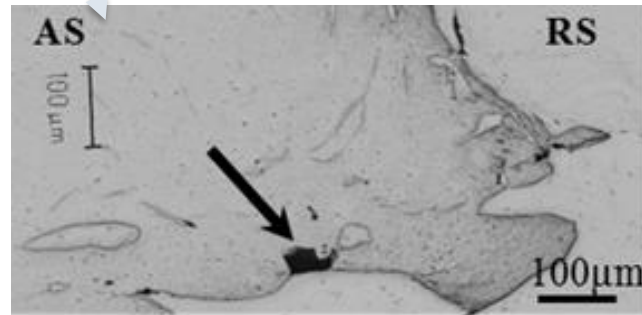
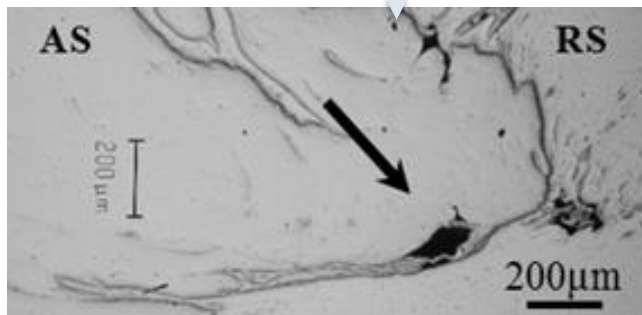
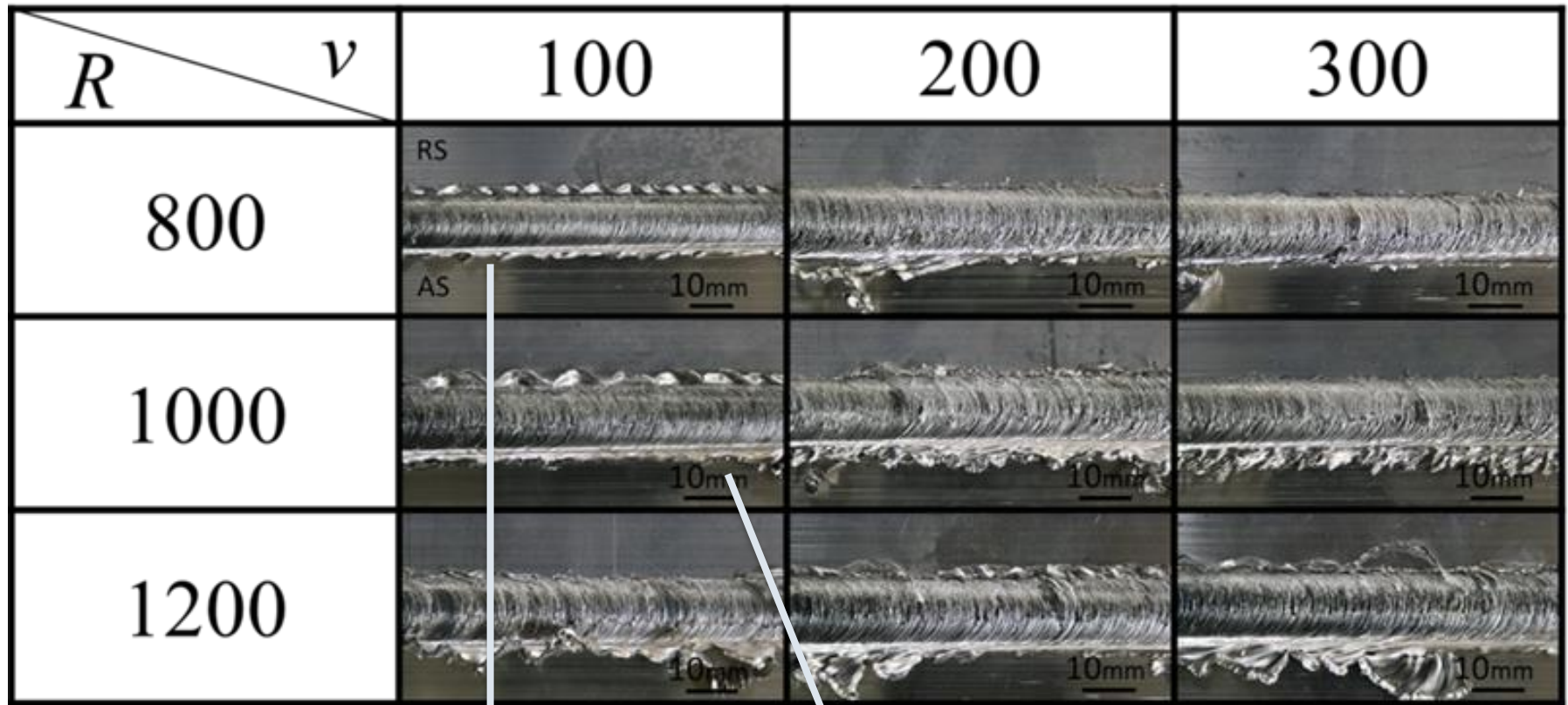
# A6005C/AZX611 (TIGアーク溶接)



溶加棒、温度分布、溶接方法について基礎的な検討を行い、溶接割れ防止の観点から、マグネシウム合金の溶加棒の適用は不適であること、溶接時には温度勾配を設けた方がよいこと、オフセット溶接が適することを見出している。



# A6005C/AZX611 (FSW)



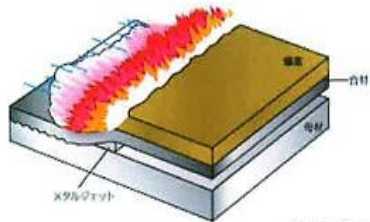


# 爆発圧着法(爆着法)

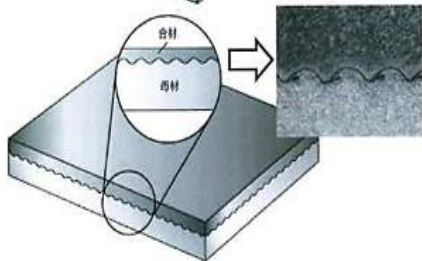
爆着は固相接合で新しい技術の1つになっている。従来の溶接では接合が困難な異種金属の接合も爆着では可能であることから工業的に爆発圧着クラッドとして生産され、現在では、化学用機器、圧力容器等の分野に使用されている



母材に対して、接合したい合材を配置。  
(母材と合材は間隙をもって配置。)  
合材の上に爆薬を配置し、  
爆薬は電気雷管によって起爆。

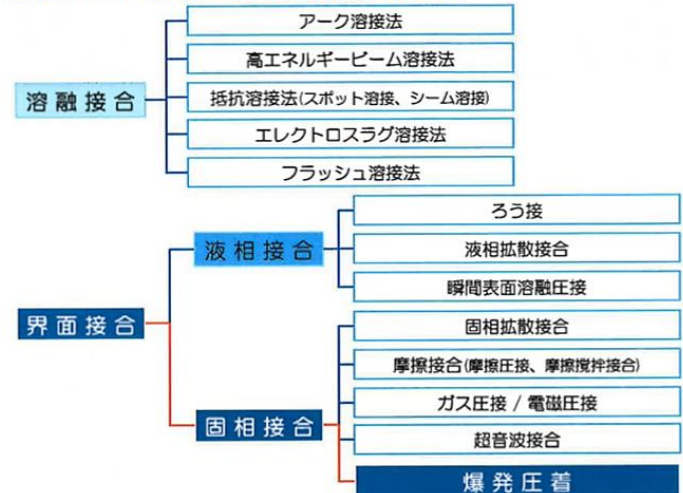


合材と母材の衝突点において、  
**メタルジェット**が生成。  
両金属は、衝突点近傍において、  
**流体的挙動**を示す。



接合界面には、波状の界面ができる。また、爆薬を配置していた面全体での接合が得られる。

## 異種金属(異種材料)の接合方法

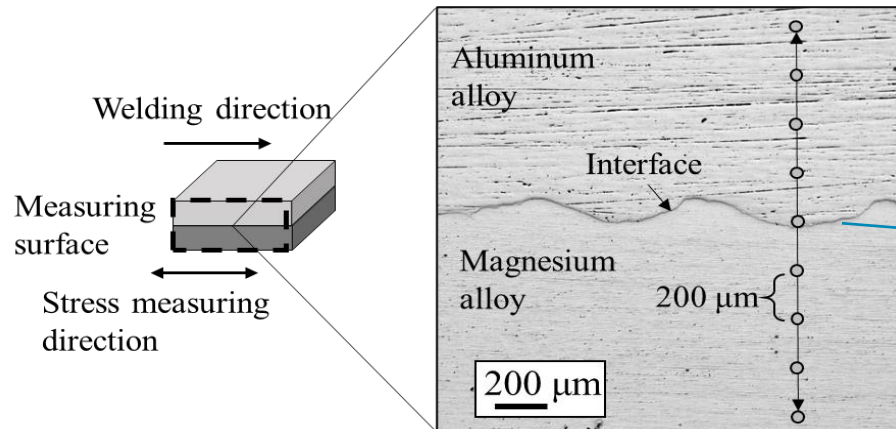


接合する金属材料の上に爆薬を設置し、爆薬の一端を起爆させると、合せ材が下方に飛翔して、母材に衝突する。その際衝突点の前方に金属ジェットが発生し、これによって両金属の表面の酸化皮膜や吸着ガスなどが排出されて、新鮮な表面が現われ、爆発圧力によって密着して接合するメカニズムである

参考: 旭化成提供  
資料

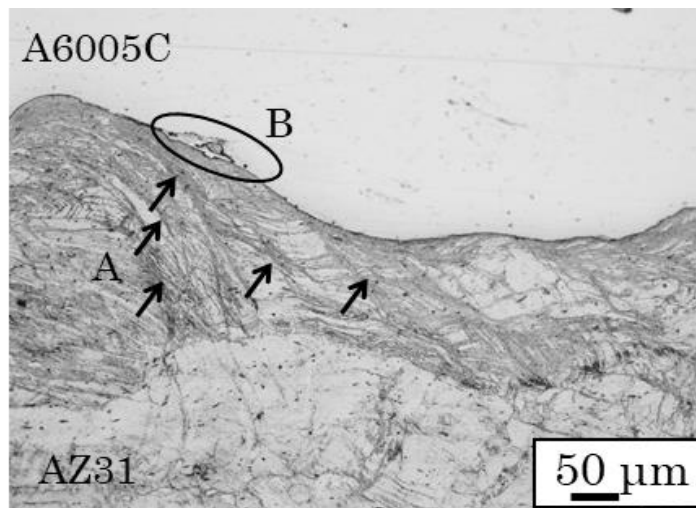
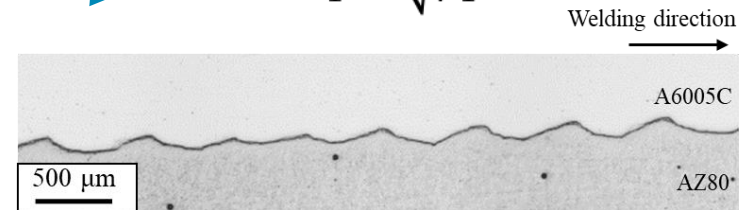
# 爆発圧着法(爆着法)の金属組織

爆着材の断面組織 (Al/Mg)



材料1及び材料2における波状界面の波長をそれぞれ $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ , 密度を $\rho_1$ ,  $\rho_2$ とすると, 波長と密度の関係は次式のように表すことができる。

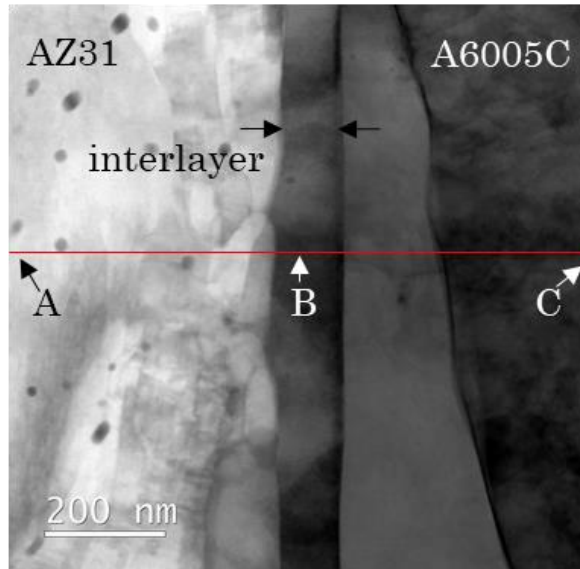
$$\frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (1)$$



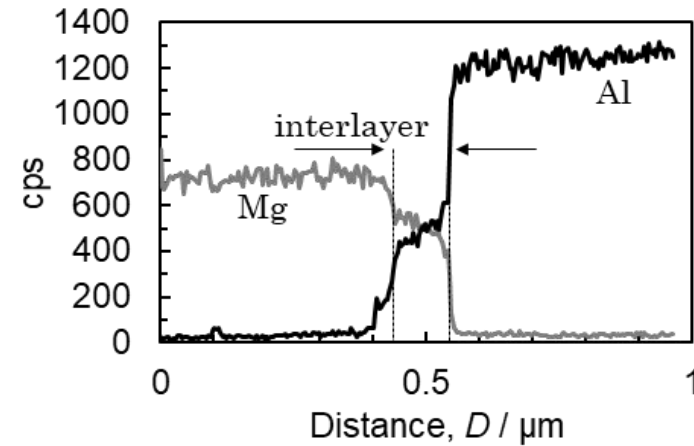
接合界面をAZ31側で観察すると, せん断帯(A)と金属組織が部分溶融して凝固した痕跡(B)が認められた。せん断帯は, 接合界面の界面下50 μm~100 μmの間において高密度に認められている。

# 爆着材の界面成分 (Al及びMg) 分析

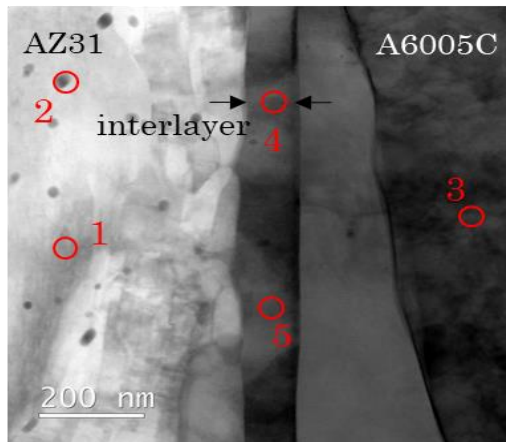
(a)



(b)



(a)



(b)

No.	Position	Mg	Al	Zn	Si	Fe	Mn
1	AZ31	98.95		0.18	0.04	0.02	
2	compound	80.67	10.79	0.22	0.34	0.04	6.95
3	A6005C		99.08			0.03	0.01
4	interlayer	53.26	45.72	0.17		0.03	0.01
5	interlayer	55.62	43.26	0.17		0.05	0.03

# まとめ

新たな取り組みとして行っている異種材接合として爆着を入れて、異種材接合に関して紹介を行った。

マルチマテリアルの考え方のように、適材適所の材料が使われるようになり、それに応じて接合技術も使い分けられる時代がやってくると考えられる。

また、現在では、×である技術課題についても、将来的には有望な接合技術になると考えられ、精進していくことが重要かと考えられる。

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



*Aluminum lightens the world*

アルミでかなえる、軽やかな世界

ご清聴を感謝いたします。