



Uematsu Lab., Dept. Mechanical and Systems Engineering
Gifu university

渦溝ツールにより作製した A6061/AZ31異種金属摩擦攪拌スポット 接合継手の疲労挙動

岐阜大学

岐阜大学

岐阜県機械材料研究所

豊和工業

○植松美彦

柿内利文

戸崎康成

麻地剛史

背景

省資源
省エネルギー化

輸送機器の軽量化



Al, Mg合金の使用が拡大



自動車産業界において
AlとMgの接合が重要



溶融法では接合界面に脆い金属
間化合物(IMC)を多量に形成

摩擦攪拌スポット接合(FSSW)

- ・固相接合法であり, IMC形成が少なく異種材接合に最適
- ・AlとMgの接合実績はほとんどない
- ・従来のプローブツールでは穴が残る欠点



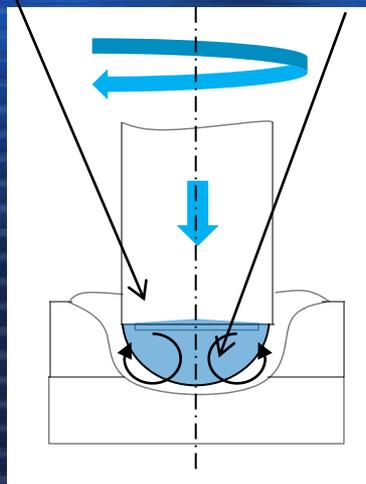
本研究の目的

プローブのない渦溝ツールを用いたFSSWにより,
A6061/AZ31継手を作製し, 継手の疲労挙動を検討する

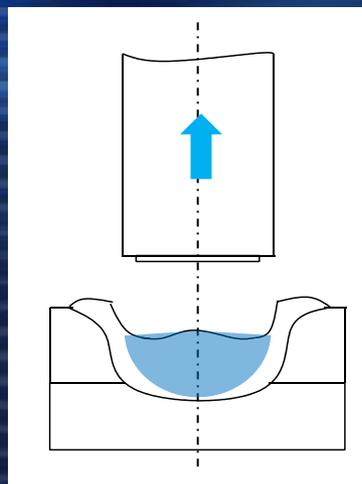


渦溝ツールによるFSSW

Shoulder Material flow

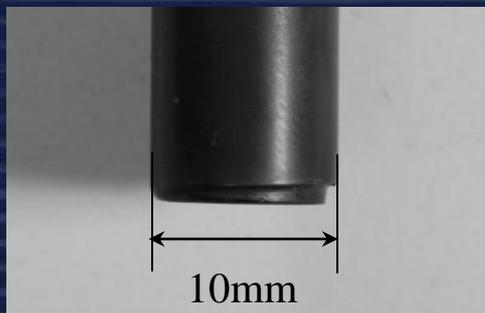


Plunge and Stir



Retract

ツール形状



Toolを回転させながら圧入



Toolの回転と圧入により
塑性流動発生



保持時間, 回転と圧入を維持



引き抜き

深さ0.5mmの渦溝



供試材料

アルミニウム合金A6061-T6, Mg-Al系合金AZ31

Chemical composition of materials(wt.%).

Material	Si	Mn	Mg	Zn	Fe	Ti	Cu	Cr
A6061	0.63	0.15	1	0.01	0.29	0.02	0.27	0.17

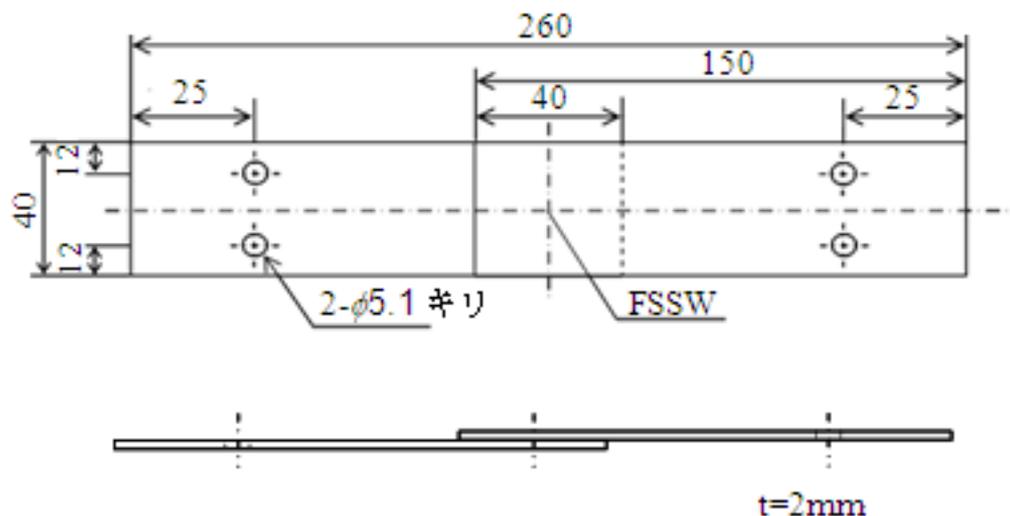
Material	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu
AZ31	3.29	0.75	0.3	0.003	0.01	0.01

Mechanical properties of materials.

Material	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength σ_B (MPa)	Elongation δ (%)	Elastic modulus E (GPa)	Vickers hardness (HV)
A6061	287	311	15	67	109
AZ31	220	290	20	45	56



実験方法



接合条件

上板:A6061

下板:AZ31

侵入深さ:1mm

保持時間:5s

回転速度:1000rpm

引張試験 万能引張試験機

疲労試験 容量49kN電気油圧式サーボ疲労試験機

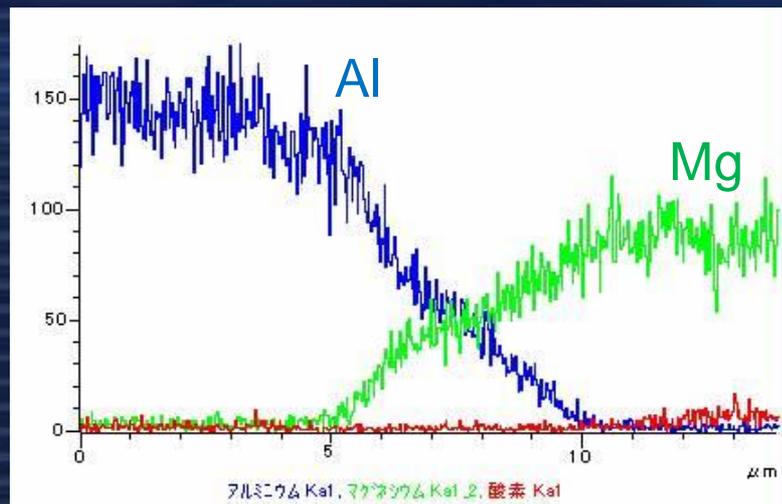
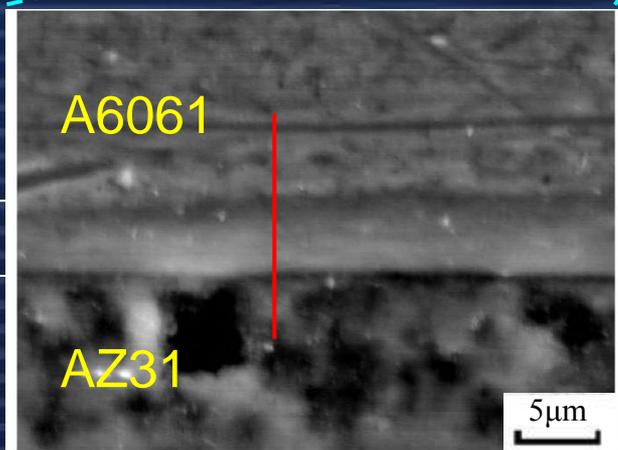
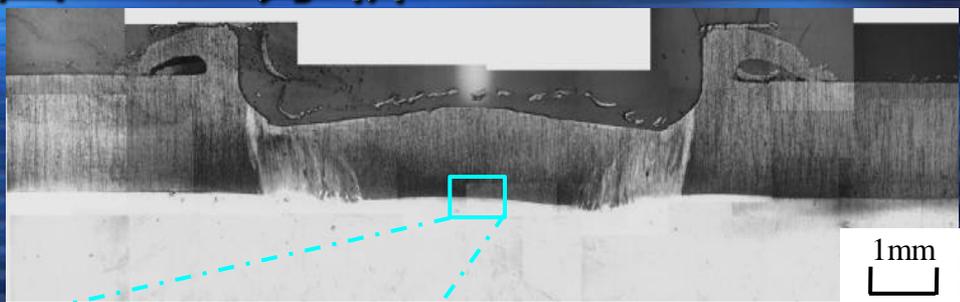
- ・室温大気中
- ・繰返し速度： $f=10\text{Hz}$
- ・応力比： $R=0.1$

破面分析 走査型電子顕微鏡(SEM)

エネルギー分散型X線分析装置(EDX)



接合部断面EDX分析



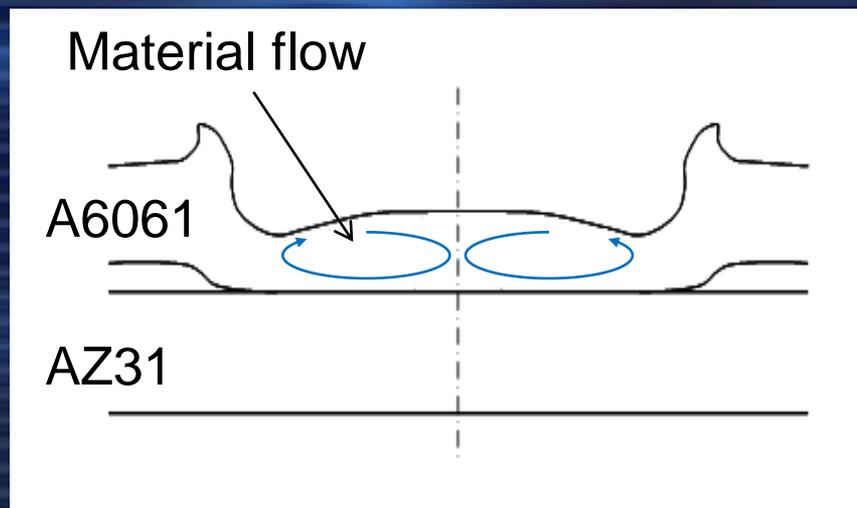
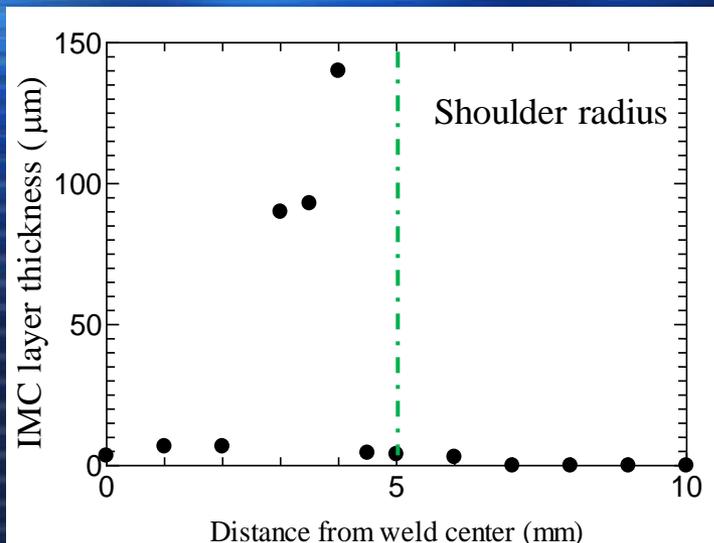
接合界面に白い層状の部分を確認

線分析⇒AlとMgの双方が存在

厚さ数µmの金属間化合物(IMC)Al₁₂Mg₁₇が形成



接合部断面EDX分析

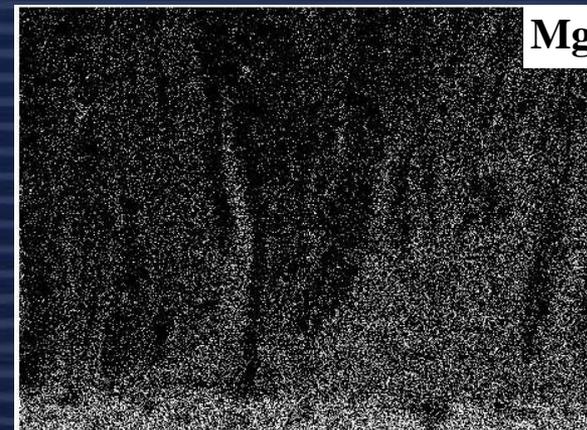
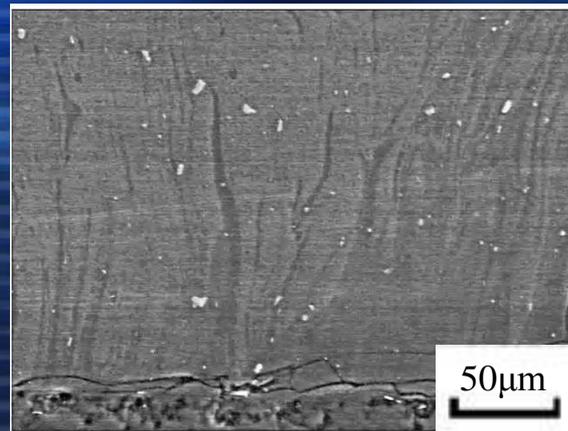


- 線分析結果から接合部におけるIMC厚さ分布を測定
- ・外周付近に向かうにつれ、IMC層が厚くなる
 - ・接合部中心付近で約5μm, 4mmの位置で約140μm

外周付近では上方向の塑性流動により
IMCが巻き上げられる



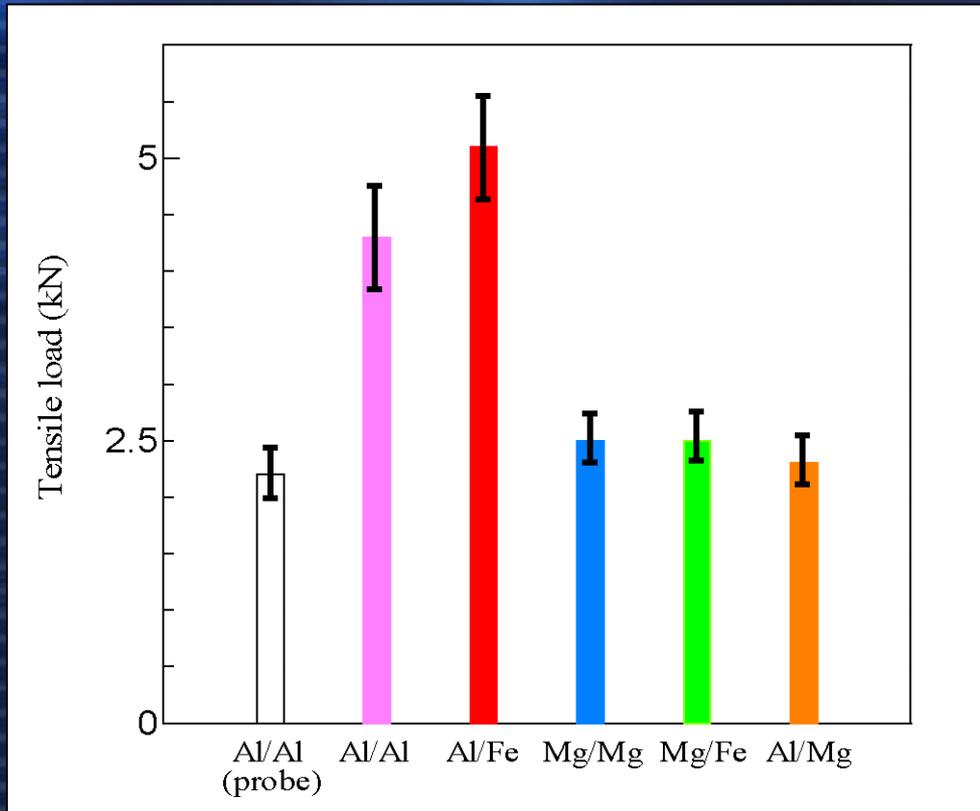
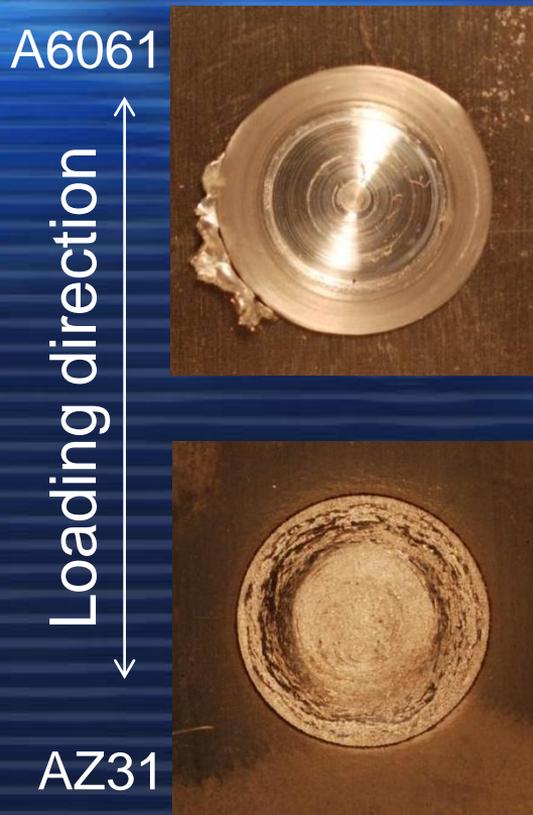
接合部断面EDX分析：中央から4mmの位置



4mmでは上方向の塑性流動により
IMCが巻き上げられている



引張り試験結果



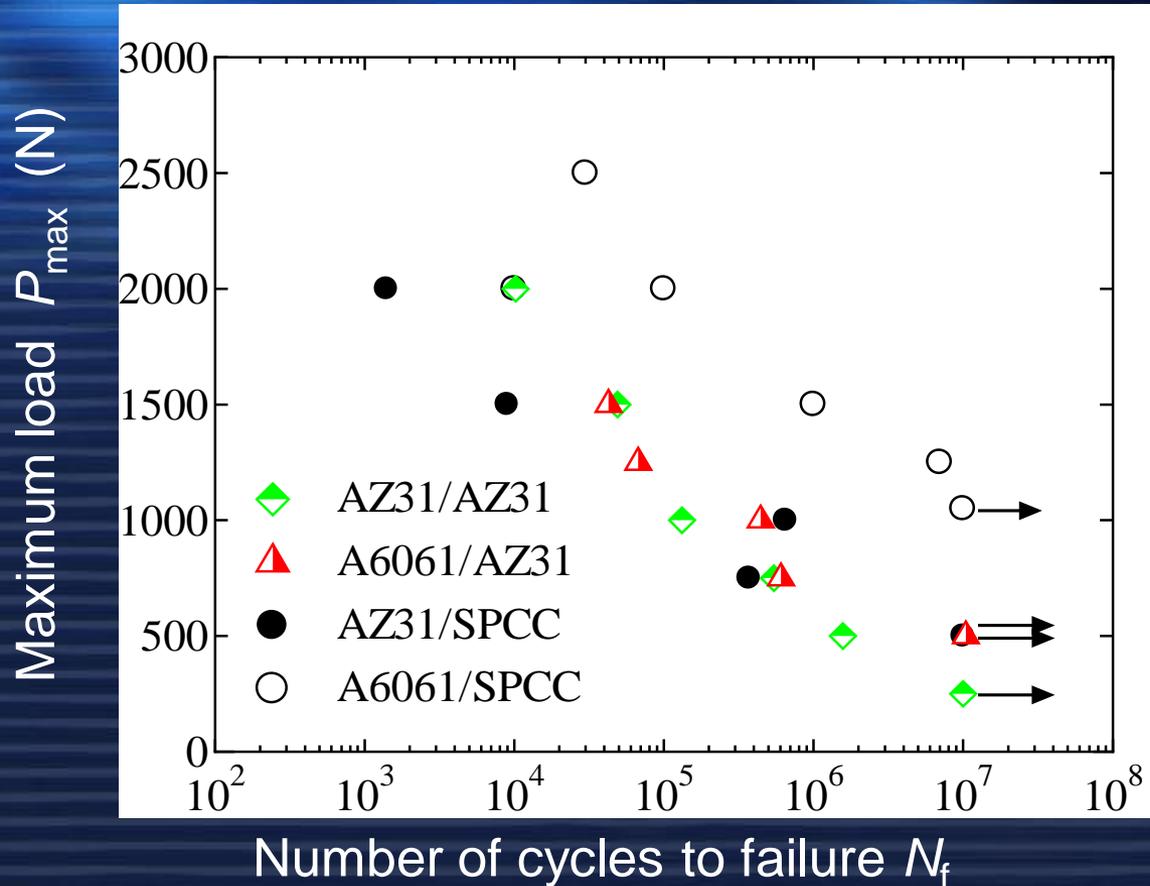
平均2.3kN > JIS A等級1.9kN

せん断破壊

AZ31/SPCC(2.5kN) = AZ31/AZ31 \approx A6061/AZ31(2.3kN)



疲労試験結果



A6061/SPCC > A6061/AZ31

AZ31/SPCC = AZ31/AZ31 \approx A6061/AZ31



渦溝ツールによるFSSWは異種金属接合に有効な手法



巨視的破面様相

Loading direction

	Fatigue fracture ($P_{\max}=1500\text{N}$)	Fatigue fracture ($P_{\max}=1250\text{N}$)	Fatigue fracture ($P_{\max}=1000\text{N}$)	Fatigue fracture ($P_{\max}=750\text{N}$)
A6061 side				
AZ31 side				

荷重依存性

1500N, 1250N ⇒ せん断破壊

1000N ⇒ せん断破壊であるが、 1000Nが破壊の遷移域

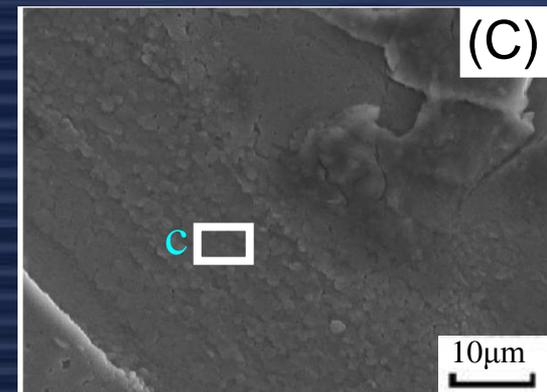
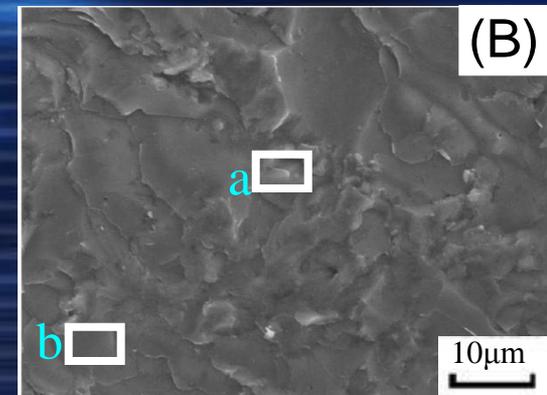
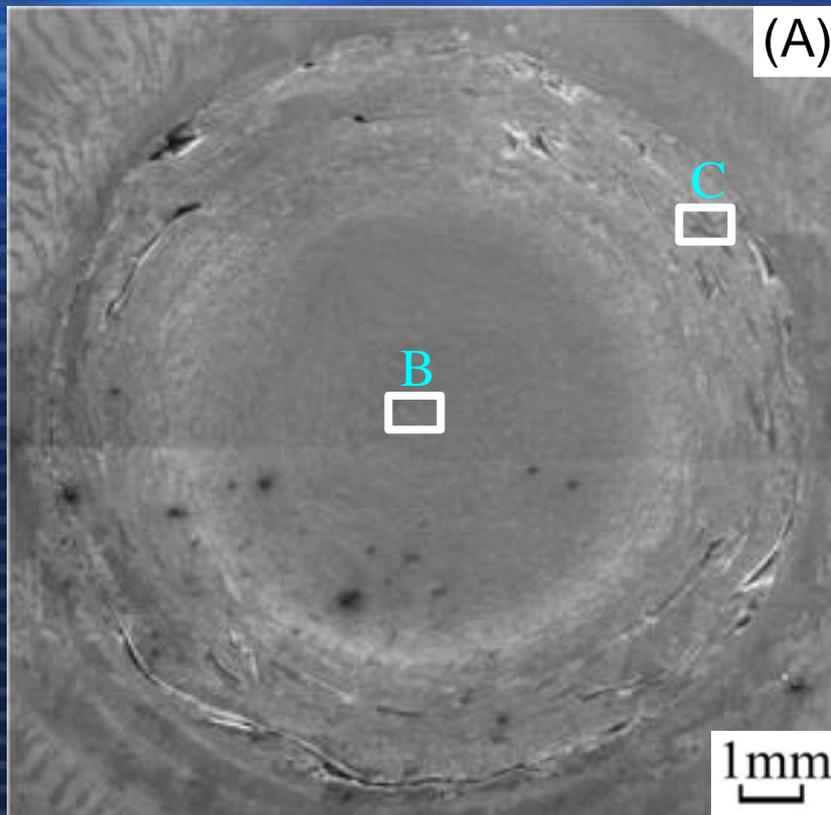
AZ31側で母材破壊の兆候

750N ⇒ AZ31側で母材破壊



微視的破面様相: A6061, 1000N

Loading direction ↑

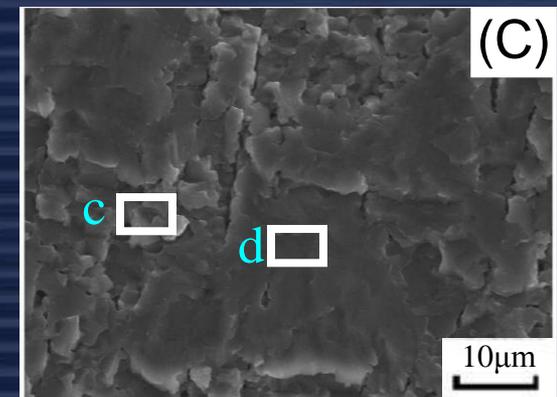
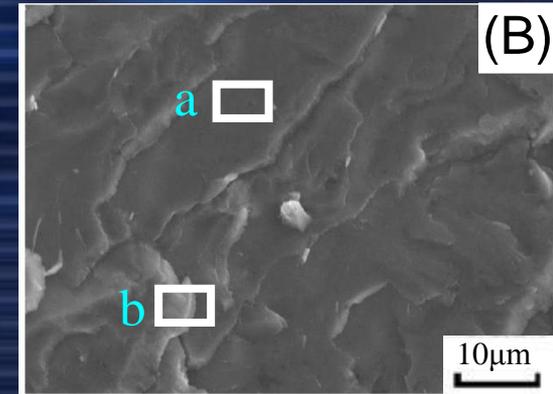
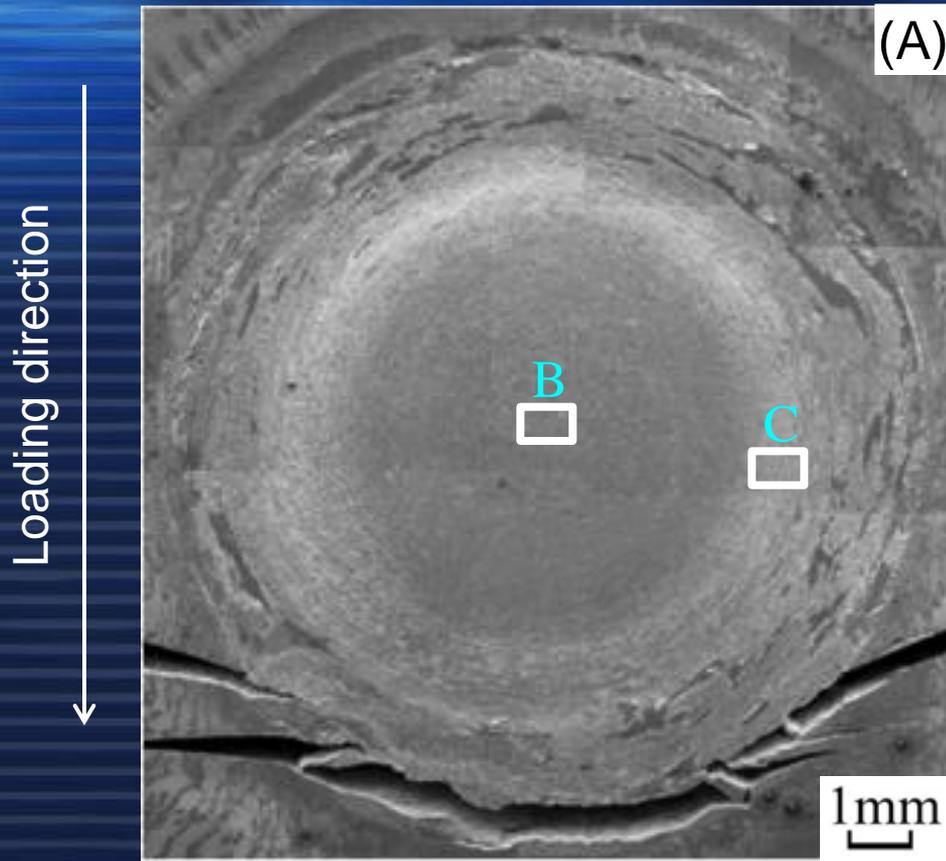


(A) 中心から3,4mmの位置にき裂
⇒ IMC層厚さが最大の位置と対応

(B) 鏡面な破面
EDX(a,b): $Al_{12}Mg_{17}$
(C) 平坦な破面
EDX(c): $Al_{12}Mg_{17}$



微視的破面様相: AZ31, 1000N

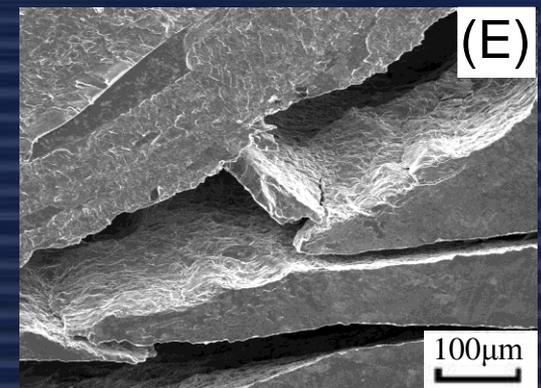
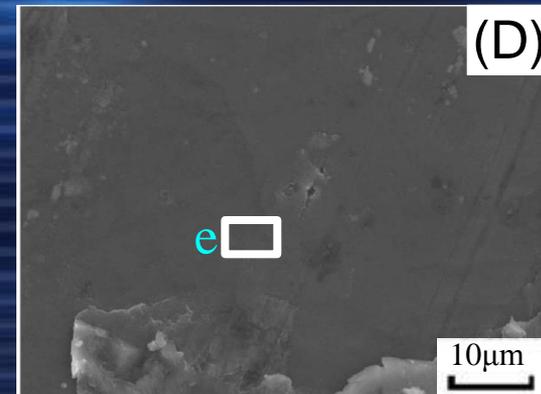
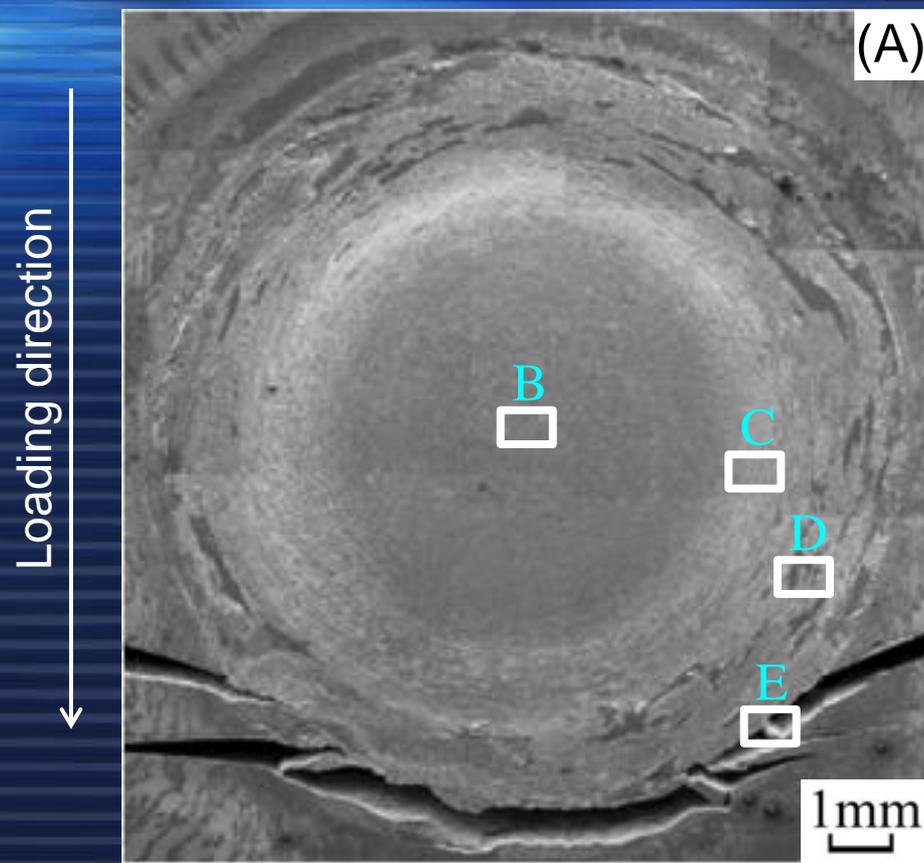


(A) 半円周方向に沿ったき裂
⇒ ナゲット部の応力集中

(B),(C) 鏡面な破面
EDX(a~d): $Al_{12}Mg_{17}$



微視的破面様相: AZ31, 1000N



(D) 平坦な破面
EDX(e): Mg

(B),(C),(D)



$Al_{12}Mg_{17}$ の内部か $Al_{12}Mg_{17}$
とMgの界面をき裂が進展

(E) ナゲット部から大きなき裂が発生



A6061/AZ31異種金属FSSWの疲労破壊機構

EDX分析⇒A6061/AZ31はIMC($Al_{12}Mg_{17}$)により接合

高荷重

⇒せん断破壊:母材より脆性的な $Al_{12}Mg_{17}$ の内部あるいは $Al_{12}Mg_{17}$ とMgの界面をき裂が進展



せん断破壊した破面のAZ31側のMg露出部の面積を測定

Fracture load(N)	1500	1250	1000
Mg area(mm ²)	2.25	9.2	2.21
Area fraction(%)	2.87	11.7	2.82

破面全体の約10%



$Al_{12}Mg_{17}$ の内部のき裂進展が支配的

低荷重

⇒母材破壊: $Al_{12}Mg_{17}$ が十分な強度に達していたためナゲット部の応力集中により, AZ31側母材にき裂が進展



結言

1. 接合界面では, ショルダーの下部で厚さ約 $5\mu\text{m}$ 程度の金属間化合物 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ の層が形成された.
2. 引張試験において, A6061/AZ31継手はすべて接合界面に沿ってせん断破壊した. その平均破断荷重は 2.3kN であった.
3. 疲労試験において, A6061-AZ31継手は渦溝ツールで接合したAZ31-SPCC継手とほぼ同等の強度を有した.
4. 疲労破壊形態は, A6061-AZ31継手において荷重依存性がみられ, $P_{\text{max}} \geq 1000\text{N}$ の荷重域では引張せん断試験同様に界面に沿ったせん断で破壊した. これに対して $P_{\text{max}} < 1000\text{N}$ の場合は, AZ31側の母材部で, ナゲットの円周方向にき裂が発生し, 板幅方向に進展して最終破断した.
5. 疲労破壊は主として金属間化合物相の割れで生じており, 金属間化合物相をより薄くすることで, より高い強度が達成可能と思われる.

