摩擦攪拌接合の基礎と応用

東北大学　大学院工学研究科
材料システム工学専攻
佐藤　裕

Tel & Fax: 022-795-7352
E-mail: ytksato@material.tohoku.ac.jp

講演内容

FSWの基礎
- 原理、特徴、ツール、装置、接合条件、メカニズム

FSSWの基礎
- 原理、装置、接合条件

FSW, FSSWのアプリケーション
- 自動車とその他分野への適用例

最新情報
- ツール材の開発状況
- チタン・チタン合金への適用
- 新しいプロセス

鉄鋼への適用
接合界面制御学講座（粉川研）の紹介
まとめ

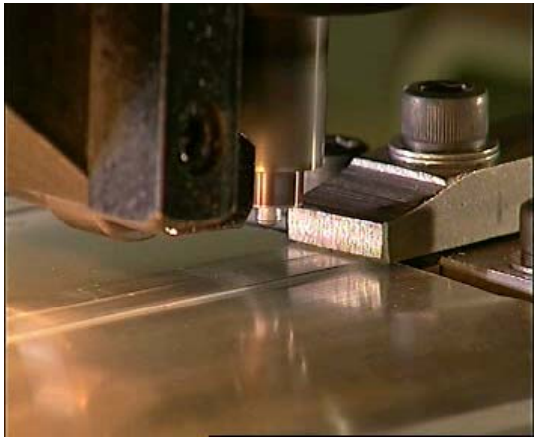
FSWとは

1991年英国溶接・接合研究所（TWI）により発明された固相接合法

日本語では、一般に摩擦攪拌接合（溶接）と呼ばれる。
英語では、Friction Stir Welding。略して、FSW。

非消耗接合ツールの回転による固相攪拌を用いて、さまざまな構造材料（Al合金、Mg合金、Cu合金、Ti合金、鉄鋼など）を高品位に接合できる方法

FSWの動画



Property of TWI

Al合金のFSW動画

FSWの特長

1. 固相接合（溶融･凝固なし）
   - 凝固偏析なし, 気孔発生なし, 高温割れなし
   - 高強度Al合金を容易に接合可 (通常、溶融溶接はできない）
   - 溶接ひずみが小さい
2. さまざまな材料へ適用可
3. 溶融溶接法に比べて、異材接合が容易
4. 溶接速度は、アーク溶接と同等もしくはそれ以上
5. 接合前処理不要（突合せ面の洗浄、脱脂、酸化皮膜除去）
6. シールドガスや溶加材が不要
7. スパッタ、ヒューム、有害光線の発生なし
8. 機械的特性は溶融溶接部より良好

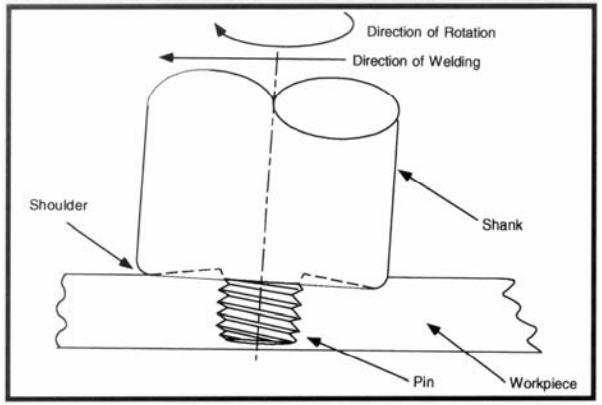
FSW接合ツール

Al合金、Mg合金用ツール
工具鋼

プローブにはネジが切ってある。

接合による摩耗はほとんどなし
無理な負荷を加えると折れることあり

接合ツールの傾斜

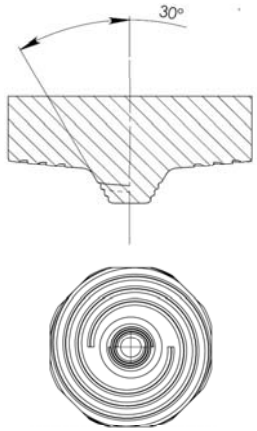


一般に、回転ツールを
約**3～5度**傾斜する。
（前進角）

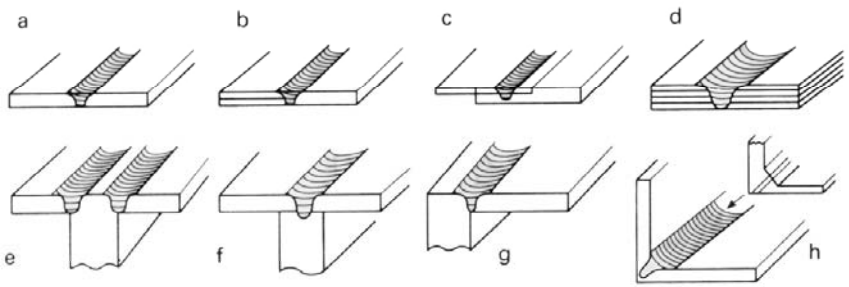
新しい接合ツール形状

PCBNツール
MegaStir製

CS4 (Convex Scrolled Shoulder Step Spiral) pin tool



FSWの継手形式



接合装置

ツールの回転
ツールもしくは材料の上下駆動と横駆動

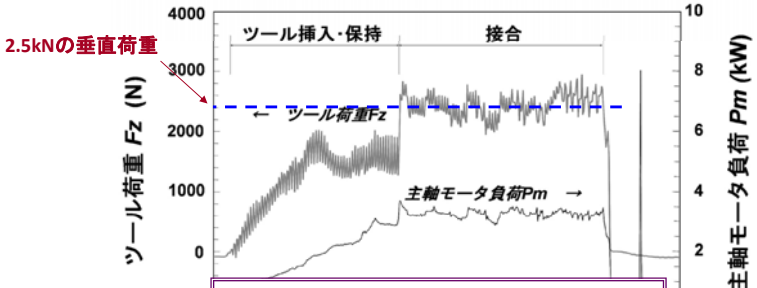
↓

汎用フライス盤でも代用可能

ツール荷重に耐える構造および剛性
ツール挿入深さの精密な制御
} が必要

ツール荷重

ツール荷重に耐える構造および剛性

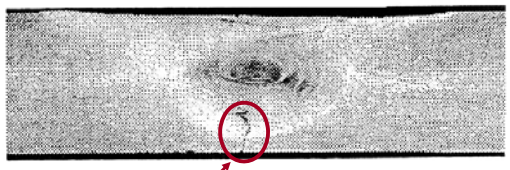


FSW中の垂直ツール荷重
Al合金： ～ 10kN
鉄鋼： 10～50kN

深さの精密制御

ツール荷重に耐える構造および剛性

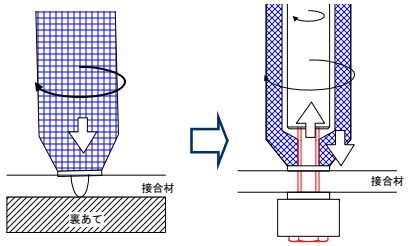
ツール挿入深さの精密な制御



突合せ面の残存： キッシングボンド
ツール挿入深さ：1/10～1/100mmのオーダーで制御す必要あり

自己保持型ツールを用いたFSW

Self-Reacting tool: 自己保持型ツール
Bobbin-tool: ボビンツール



MTSの論文(4th FSW Symposium)より

ボビンツール方式FSWのメリット
- 接合治具の簡素化
- 接合部の信頼性向上（底面部の欠陥の防止）
- 生産性（接合速度の向上）

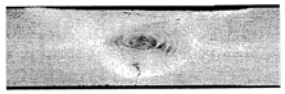
FSWの条件

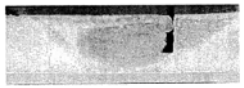
- プローブの挿入深さ
- ツールの回転速度 (rpm)
- ツールの接合（走行）速度 (mm/min)

接合条件	入熱量大	入熱量小
回転数	大	小
接合速度	小	大
ツール挿入量	大	小
接合材板厚	大	小

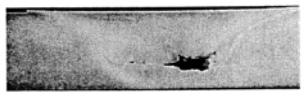
これらの組み合わせが最適でなければ、欠陥が発生

FSWで発生する欠陥





キッシングボンド
（Kissing Bond）
ツール挿入深さの不足



トンネル状欠陥
材料の攪拌不十分

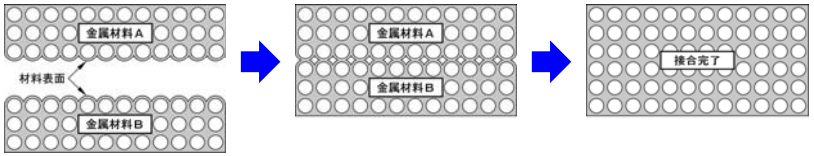
日立製作所のデータ

FSWと溶融溶接の比較

	溶融溶接	FSW
接合温度	融点以上	融点の75%程度
ミクロ組織	凝固組織 粗大結晶粒 凝固偏析	微細結晶粒 均一組織
溶接ひずみ	大	極めて小
延性	小	大
エネルギー消費量	大	溶融溶接の2/3
技術者	必要	不要

固相接合のメカニズム

表面の汚染層（酸化皮膜や汚れ）を取り除き、2つの材料の原子を十分に近づける。



実際の材料表面には酸化皮膜あり
平滑表面を作製したつもりでも、表面の凹凸は原子レベルよりも大きい。

酸化皮膜をいかに壊すか？
2つの材料の原子をいかに近づけるか？

酸化皮膜の挙動

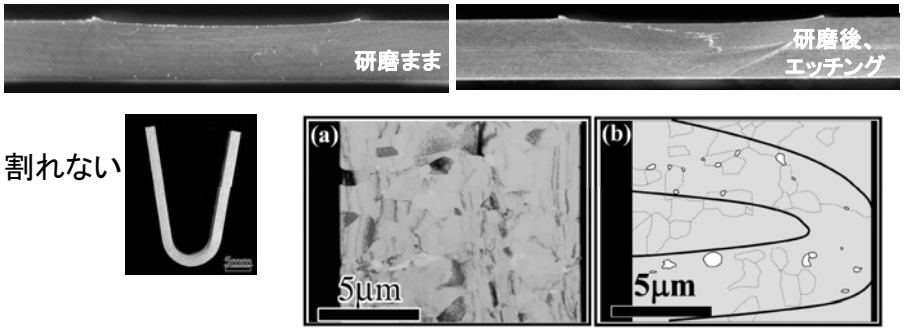
突合せ面上の酸化皮膜

酸化物はどうなるのか？　どこへ行ってしまうのか？
それらは特性にどう影響するのか？

局部領域のミクロ組織観察で酸化物を観察する！

透過電子顕微鏡（TEM）観察

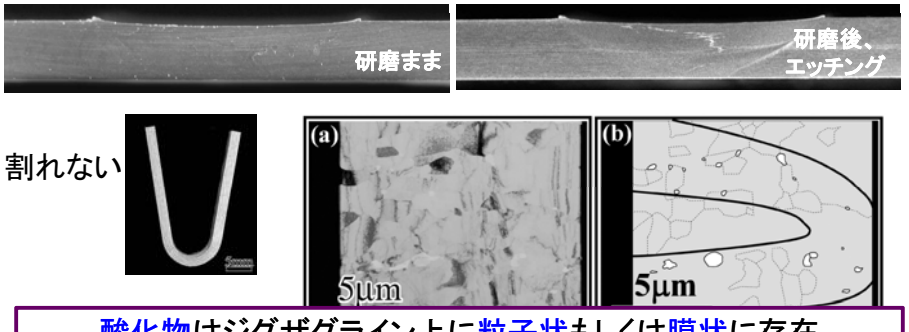
酸化皮膜の挙動と分布



割れない

割れる

酸化皮膜の挙動と分布



割れない

酸化物はジグザグライン上に粒子状もしくは膜状に存在

粒子状酸化物　→　特性に悪影響を及ぼさない

↓

酸化膜は分断され、攪拌部内に残存

材料の流動と変形

酸化皮膜の分断　→　FSWにとって重要

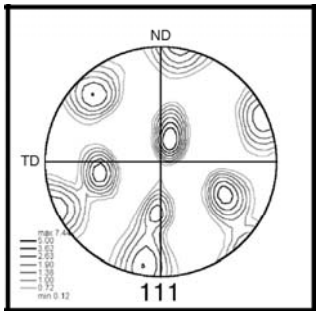
どのような力を受けて分断されているのか？
被接合材はどのように動いているのか？

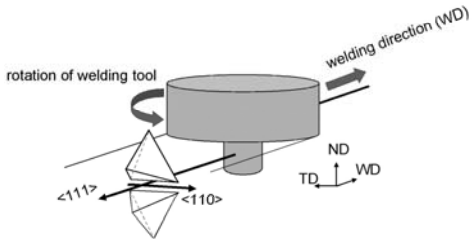
局部集合組織（結晶方位の集積）の解析により検討

塑性流動（塑性変形）：すべり変形により生じる。
すべり変形は、結晶学的な最稠密面上の最稠密方向に生じる。
塑性流動　→　受けた変形に起因して結晶方位が揃う（集合組織）

集合組織解析　→　変形モード、塑性流動の予測が可能

材料の流動と変形



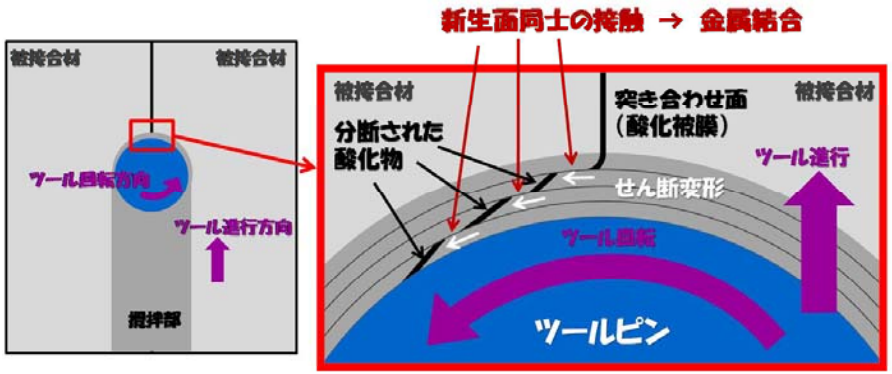


集合組織：回転ピン表面上で回転ピン方向へ働く単純せん断変形の痕跡

FSWの変形　＝　単純せん断変形
材料の動き：　回転方向に平行にピン表面を移動

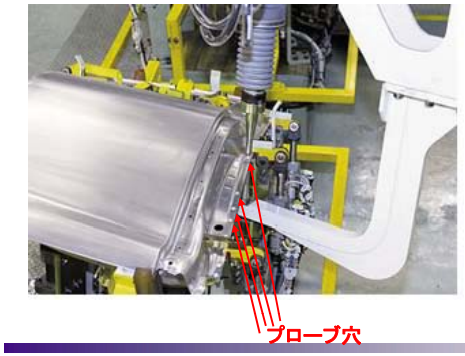
酸化皮膜にはせん断力が作用　→　新生面の露出　→　金属的接合

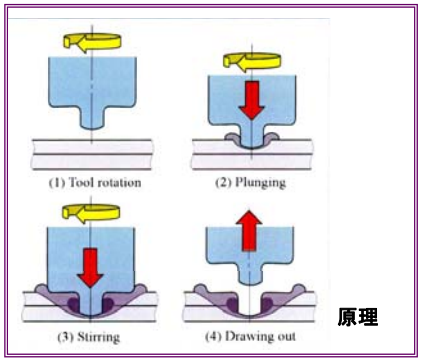
FSWの接合メカニズム



摩擦攪拌点接合

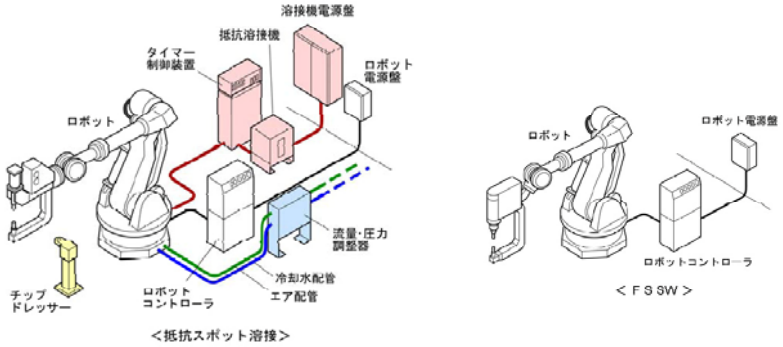
摩擦攪拌点接合
Friction stir spot welding (FSSW)
Spot FSW
FSJ





Al合金の抵抗スポット溶接の代替として発展

RSWとFSSWのシステム構成



システムの簡素化
電力消費量の低減

川崎重工カタログより

FSSWの条件

位置制御
- ツール回転速度
- 挿入深さ
- 接合時間　など

荷重制御
- ツール回転速度
- ツール荷重
- 接合時間　など

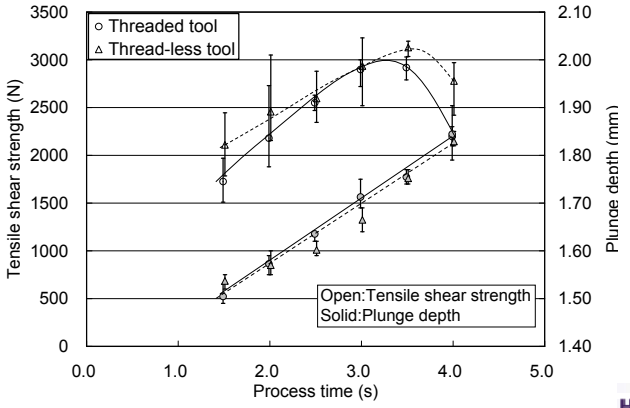
接合部の品質

強度と接合時間の関係

荷重制御方式FSSW　（ツール荷重：4508N）

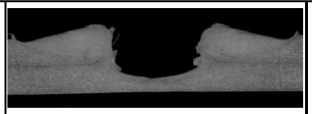
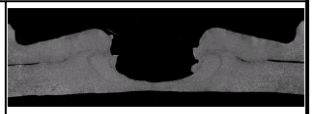
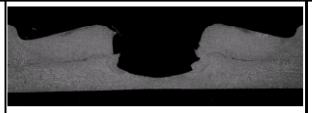
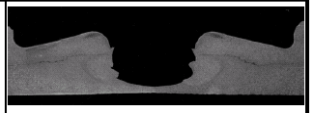
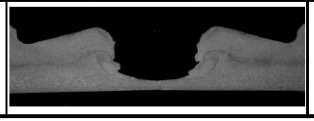
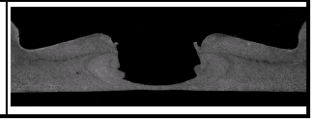
材料：6061アルミニウム合金　（板厚：1mm）

ツール回転速度：2000rpm



藤本ら：溶接学会論文集, 26 (2008), 253.

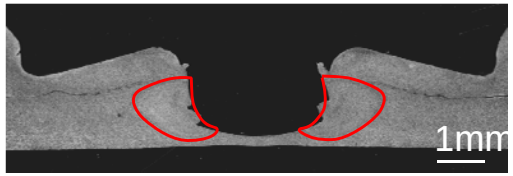
断面マクロ

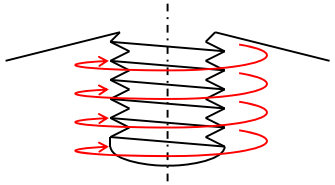
Process Time	Macro section	Process time	Macro section
1.5s		3.0s	
2.0s		3.5s	
2.5s		4.0s	

藤本ら：溶接学会論文集, 26 (2008), 67.

プローブ周りに楕円形領域が形成
接合時間の増加　→　楕円形領域が拡大、ショルダ端での上板厚が減少
接合時間が短い場合：　界面破断　　接合時間が長い場合：ショルダ端から上板側へ破断

楕円形領域の形成





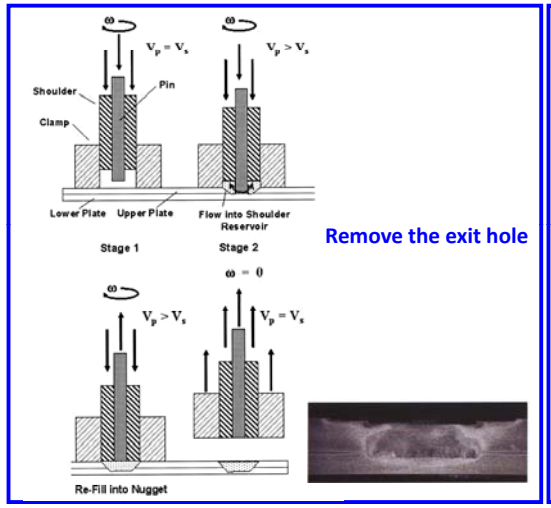
藤本ら：溶接学会論文集, 26 (2008), 67.
Sato et al.: Mater. Sci. Forum, 638-642 (2010), 1243.

上板の材料がねじ山によりトラップされて下板側に移動したもの

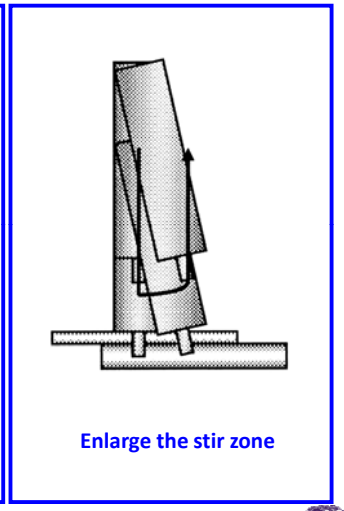
塑性流動
　楕円形領域の外側でも起こっている
　→　外側でも重ね面同士の接合達成

楕円形境界：　初期重ね面

FSSWの発展型



Refill FSSW
(GKSS, Germany)



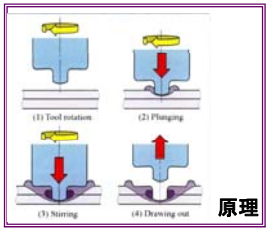
Swing FSSW
(Hitachi, Japan)

自動車（部品）への適用例

自動車(部品）への適用例１

FSSWによるフード、リアドアの製造

マツダ　RX-8



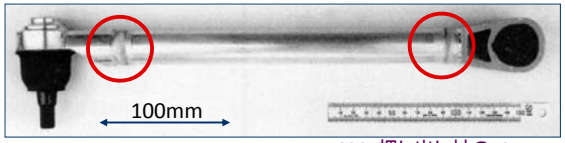
原理

トヨタ　プリウス

自動車（部品）への適用例2

Al合金押出し材の円周FSW
→ サスペンションアーム

昭和電工



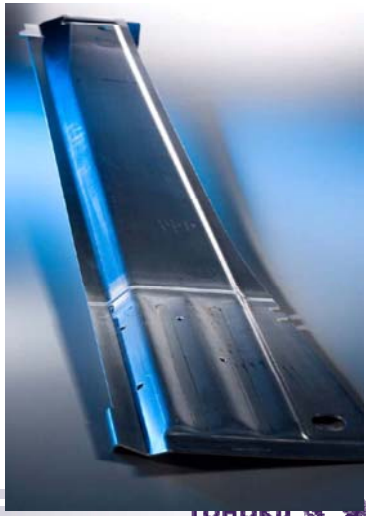
AA6061押し出し材のFSW

NISSAN CIMA

自動車(部品）への適用例3

世界初
Al合金FSW部のテイラードブランク

AUDI R8
Center Tunnelの衝突吸収構造部材

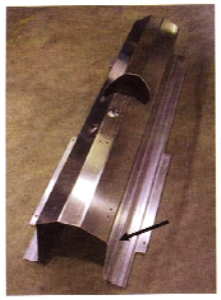


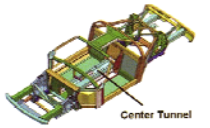
高速FSWの動画

Property of TWI

6013Al合金のFSW　6m/min

自動車(部品）への適用例4





Arbegast: Weld. J., 85-3 (2006), 32.

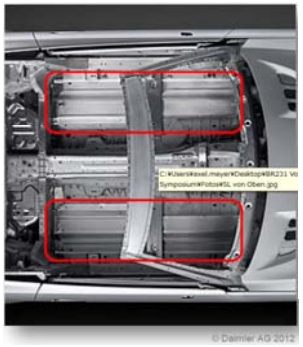
Ford GT

5000系/6000系Al合金の重ねFSW

自動車(部品)への適用例5

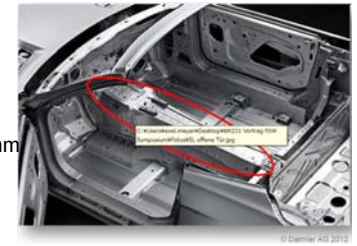
メルセデスSL
(New model)
オールアルミボディ

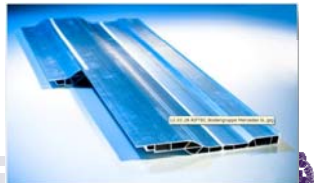
床
6106-T6
1.70mm depth



センタートンネル

6016-T4
板厚1.25/2.00/1.50mm

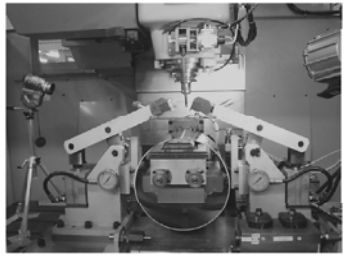


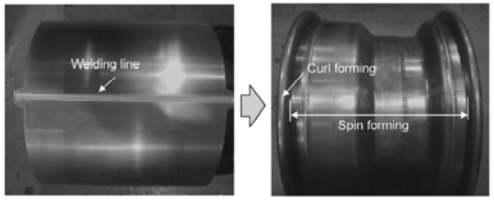


Meyer: Proc. 9th FSW Symposium, 2012, CD-ROM.

自動車(部品)への適用例6

4輪バギー車のホイール





(a) Roll forming and seem welding (b)Spin and curl forming

木村ら：軽金属, 57 (2007), 554.

自動車(部品)への適用例7

摩擦熱を利用した鉄とアルミ材の点接合技術(接合過程)

Al/Feの異材FSSW

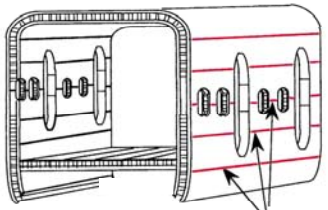
マツダ・ロードスター
トランクリッドの部材に適用

その他の適用例

アプリケーション

鉄道車両

日本、欧州



通勤電車　JR九州815系

つくばエキスプレス

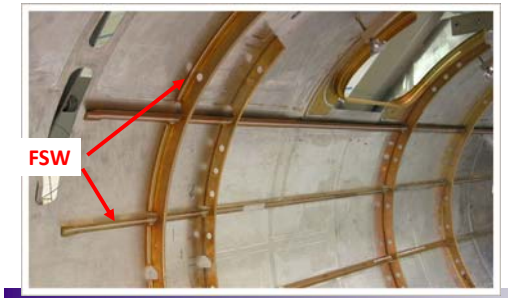
アプリケーション

新加古川大橋の拡幅部
住友軽金属、住軽日軽エンジニアリング

アプリケーション

航空機体
エクリプス500ジェット
（小型ビジネスジェット）

Eclipse Aviation, USA



アプリケーション

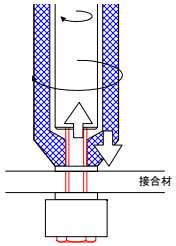
デルタII、IVロケットの外部燃料タンク

Boeing, USA

アプリケーション

H-IIBロケットの燃料タンク
2219アルミニウム合金のボビンツールFSW

三菱重工



二村ら: 三菱重工技報, 45-4 (2008), 17.

アプリケーション

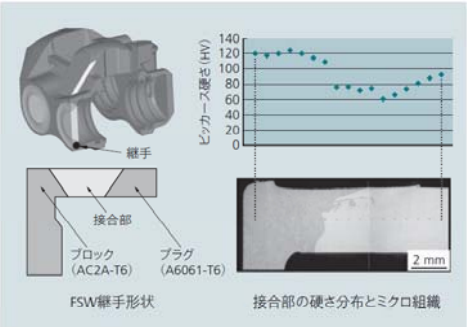
防衛庁向け無人標的機（ターゲットドローン）
板厚1mmのA6061合金のFSW

富士重工業

http://www.fhi.co.jp/news/04_07_09/04_08_31.htm

アプリケーション

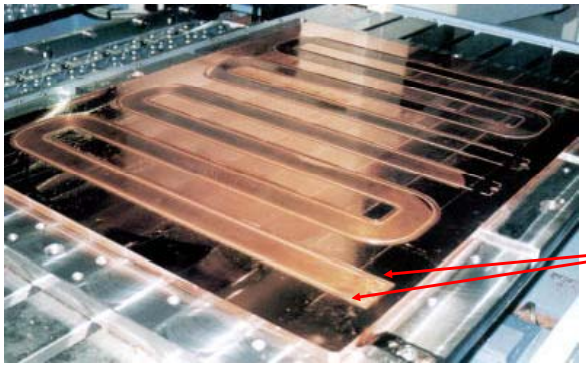
二輪車用ブレーキキャリパ
AC2A-T6/A6061-T6　異種Al合金FSW
→ ボルトレス（モノブロックキャリパ）
→ 20%軽量化に成功



日立論評, vol. 91-10 (2009), 796-797.

アプリケーション

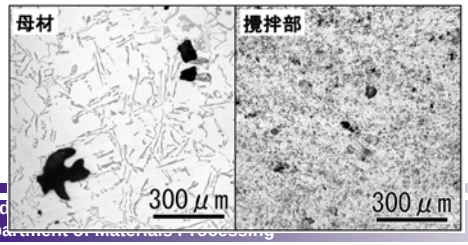
液晶スパッタリング装置の冷却板
CuのFSW



鋳物の改質

凝固組織（不均一）　→　低延性
鋳造欠陥の存在　　→　低疲労強度

FSPによる組織の均質化、鋳造欠陥の除去
→　延性、疲労強度の向上



鋳造Al合金（AC4C）

組織は微細かつ均質化

Sato et al.: *Proc. IWJC-Korea2002*, (2002), 493.

最新情報

- 接合ツール材の開発状況
- チタンおよびチタン合金のFSW
- すみ肉FSW
- 固定式ボビンツール
- 鉄鋼へのFSW適用例

接合ツール材の開発状況

鉄鋼やチタン・チタン合金のFSW
1000℃付近でも十分な強度、靭性、耐摩耗性が必要

- W合金 (cp-W, W-25%Re合金)
- Ir合金
- WC-Co (超硬)
- セラミックス (Al_2O_3, Si_3N_4)
- 超硬質材 (pcD, PCBN)
- 複合材料 (pcBN/W-Re)

CS4: Convex scrolled shoulder, step spiral

CS4 PCBN tool

Produced by MegaStir Technologies

複合材料ツール　～Qシリーズ～

cBNとW-Re合金の複合材料

Q60、Q70、Q80　→　複合材料におけるcBN量が60、70、80%

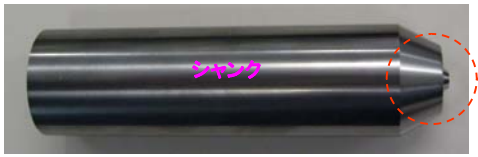
PCBNツールよりも耐摩耗性にやや劣る
靭性が高い　→　　予期せぬツール破断なし
　　摩耗後の再研磨可能

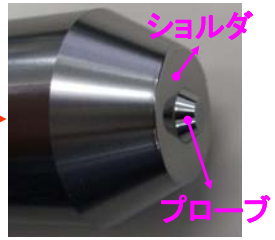
Q60ツール（6mmピン）
→
304ステンレス鋼
42mのFSW

Co基合金ツール

$L1_2$構造の$Co_3(Al,W)$により強化されたCo基合金

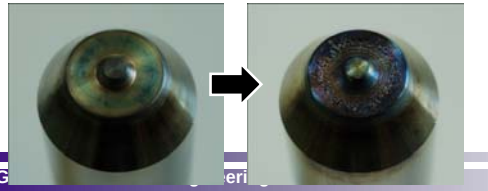
「精密鋳造 → 熱処理 → 切削」で作製可能





安価 & 高特性

Co基合金ツール



チタンおよびチタン合金のFSW

- 材料：工業用純チタン（板厚3mm）
- 接合条件：200～400rpm、60mm/min
- 接合ツール：Mo基合金

Tool after FSW

No tool wear

200rpm
欠陥なし

300rpm
欠陥なし

400rpm
欠陥あり

表面荒れ

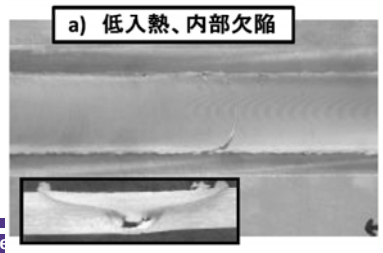
低熱伝導率のため

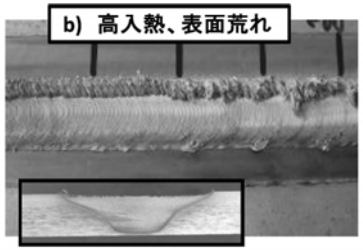
チタンおよびチタン合金のFSW

表面荒れ ← 過熱が原因

低入熱：滑らかな表面（適温） ⇔ 内部欠陥（低温）

高入熱：表面荒れ（過熱） ⇔ 内部欠陥なし（適温）

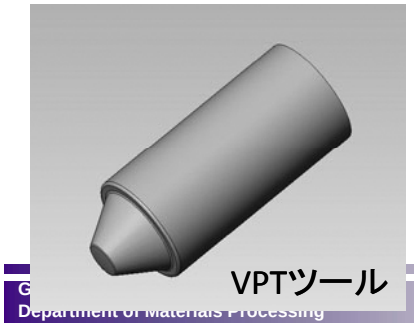


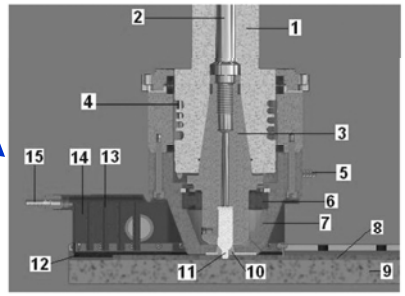


チタンおよびチタン合金のFSW

表裏面の温度差をなくす工夫が必要

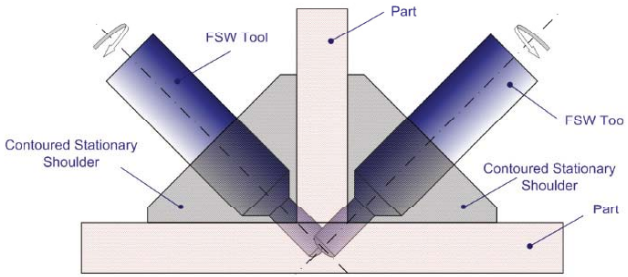
- VPTツール
- Stationary Shoulder FSW
  （ショルダ無回転FSW）

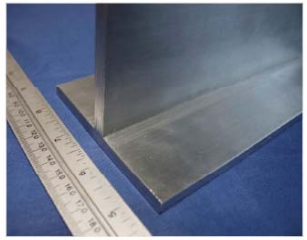


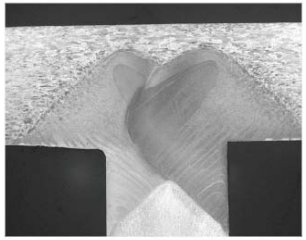


1. 回転スピンドル
2. 引き棒
3. ツールホルダ
4. 水冷管
5. 不活性ガス導入口
6. ベアリング
7. 固定ツール部
8. チタン板
9. 裏当て板
10. スライド滑走面
11. 回転プローブ
12. スライドシール
13. 冷却ガスチューブ
14. ガスチャンバー
15. 不活性ガス導入口

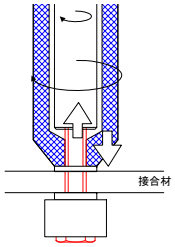
すみ肉FSW







固定式ボビンツール



これまでのボビンツール

固定式ボビンツール
Fixed geometry bobbin tool

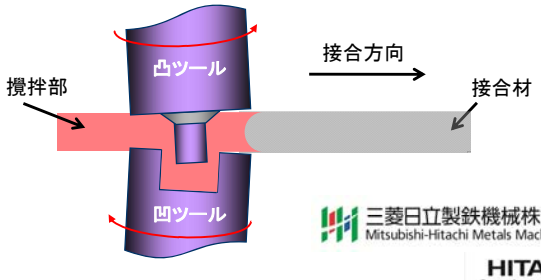
上ショルダ
プローブと下ショルダ
別々に回転

上ショルダ、プローブ、下ショルダが一体

特殊な装置が必要

特殊な装置が不要

凹凸ツール方式を利用した両面FSW

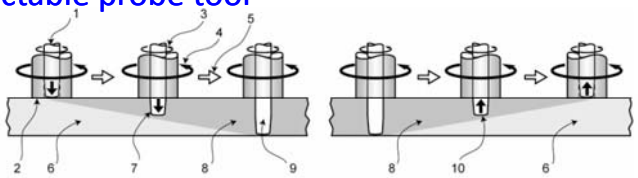


三菱日立製鉄機械株式会社
Mitsubishi-Hitachi Metals Machinery, Inc.
HITACHI
Inspire the Next

機　能		効　果
独立した回転機構	傾斜角度	十分な押圧力による**高速接合**を実現
	回転方向	逆回転による**薄板の接合**を実現
凸ツール凹ツール	プローブが凹みに挿入できる構造	接合板厚に応じてツール間の距離を変化させることで、**1種類のツールである範囲の板厚に適用可能**
		主軸負荷制御により、接合途中の**板厚や突合せギャップの変化に柔軟に対応可能**

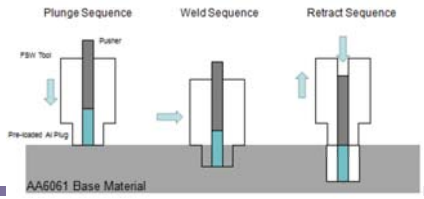
プローブ穴の除去

✓ Retractable probe tool　ISO 25239 Part 1



✓ All-in-One exit hole elimination technique

Thompson et al.: Proc. 9th FSW Symposium, 2012, CD-ROM.



鉄鋼に対する適用例

最初の報告

1999年、TWIが純Wツールを用いた軟鋼と12%Cr鋼のFSW可能性について報告

W.M. Thomas et al.: Sci. Techol. Weld. Joining, 4 (1999), 365.

鉄鋼用FSWツールの開発

Ex. **PCBN** (Polycrystalline cubic boron nitride), **W alloys**

➡ 適用可能性試験、継手特性評価

純鉄	炭素鋼
HSLA鋼	超微細粒鋼
パイプライン鋼	ステンレス鋼
高張力鋼	高窒素鋼

etc.

鉄鋼FSWの要件

高剛性な装置

ツール軸方向荷重 > 50kN
回転モータ出力 > 11kW
回転軸ぶれ < 0.05mm

東北大のFSW装置
日東制機製

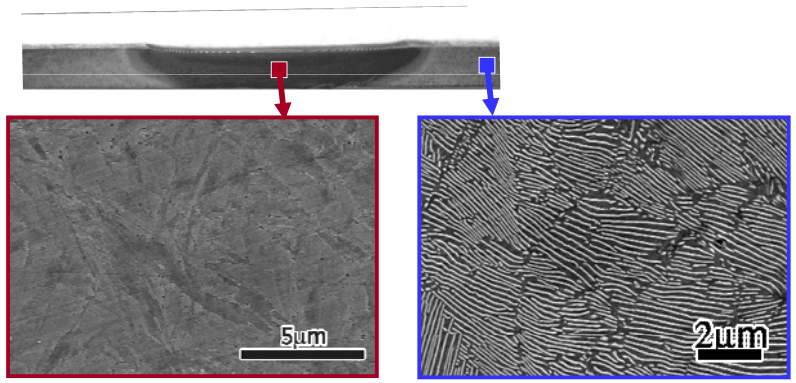
仕様
軸方向荷重: 53kN
回転速度: 100～3000rpm
接合速度: ～10m/min

接合ツール

高温で強度、耐摩耗性が高い
靭性が高い
接合材との反応性が低い

鉄鋼FSWの適用例

SUJ2軸受鋼 （Fe-1.0%C-1.4%Cr）
PCBNツール　400rpm、76mm/min



接合欠陥なし　顕著なツール摩耗なし
撹拌部にマルテンサイト形成 ➔ 著しい硬さ上昇

Y.S. Sato et al.: Scripta Mater., 57 (2007), 557.
Y.S. Sato et al.: ISIJ Intern., 48 (2008), 71.

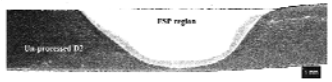
摩擦攪拌によるナイフ製造

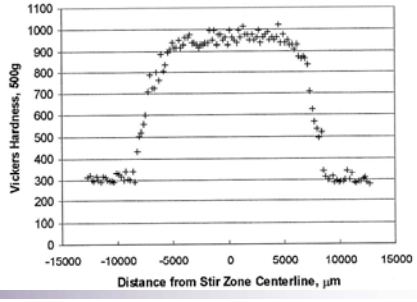
摩擦攪拌

→ 攪拌部での著しい硬さ上昇を利用

Nominal chemical composition of D2 tool steel (wt%).

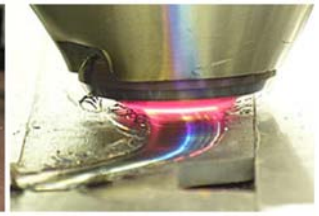
C	Cr	Mn	Si	Ni	Mo	V
1.4-1.6	11.0-13.0	0.6 Max	0.60 Max	0.30 Max	0.70-1.20	1.10 Max





Sorensen et al.: Friction Stir Welding and Processing IV, TMS, 2007, 409.

摩擦攪拌によるナイフ製造

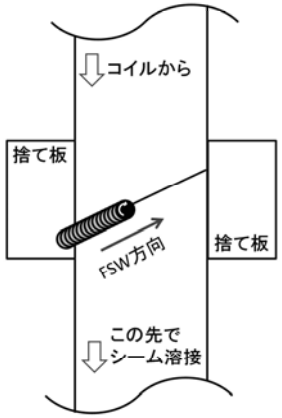


FSP ➔ レーザ切断 ➔ 研磨

鉄鋼へのFSWの適用例

2. パイプ用板材のFSW

Global tubing LCC



鉄鋼FSWの適用例（計画段階）

パイプライン（鋼のFSW）

MegaStir, BYU, ExxonMobil, ORNL etc. (USA)

Property of MegaStir and Tecnara FSW Company

鉄鋼へのFSWの適用例

3. パイプのFSW （計画段階）

Conventional Welding

Multiple stations to support multiple passes

Friction Stir Welding

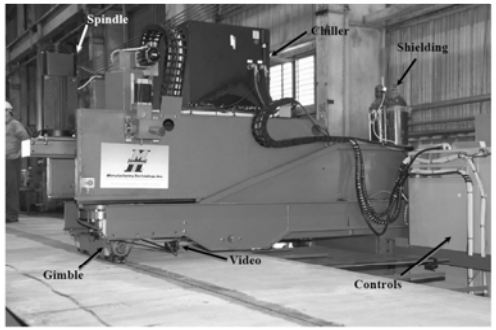
Single station with one-pass welding

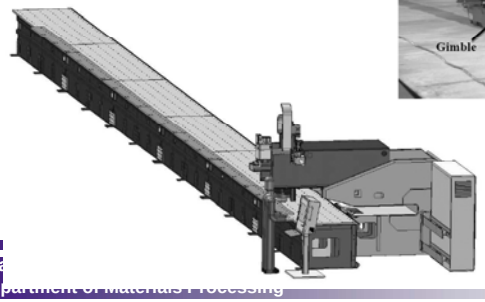
鉄鋼へのFSWの適用例

4. 船舶のFSW （計画段階）

HSLA65のFSW
（6mm厚×2.4m幅×20m長）

船舶製造現場での施工に成功
溶接ひずみはほとんどなし





1パス20mm厚のFSW

新グレードのPCBN: MS90
プローブ長：18.8mm
シャンク径：50mm

軟鋼（1018 steel）（20mmt）
200rpm、76mm/min

接合界面制御学講座（粉川研）

佐藤　裕　准教授

粉川博之　教授

藤井啓道　助教

接合プロセスに材料組織学的な観点からアプローチし、接合プロセスの最適化、接合部・接合界面の組織制御、接合部・界面の高性能化を試みる。
材料内部に存在する界面を制御し、高機能性材料の作製を試みる。

- ✓ 摩擦攪拌（点）接合、摩擦攪拌プロセッシングに関する研究
- ✓ 超音波を利用した固相接合に関する研究

摩擦攪拌に関する研究

FSW, FSSW, FSPの材料学的研究拠点

摩擦攪拌中の組織形成機構
材料学に基づいた接合メカニズム
諸特性に及ぼす材料組織因子の解明
摩擦攪拌中の組織制御、組織改質
材料学に基づいた接合ツールの開発　　など

世界的にも認知されたアクティビティ

FSW関連論文数:	55報 （世界第3位）
論文の被引用数:	2,057回 （世界第1位）
国際会議での招待・基調講演:	12回
国際会議の主催:	6回

摩擦攪拌装置

日東制機製　TU-01型

仕様:
最大荷重: 53kN
回転速度: 0 ~ 3000rpm
接合速度: 18mm/min ~ 10m/min
ツール挿入制御: 荷重 or 位置

鉄鋼やチタンの摩擦攪拌が可能な設備を有する数少ない研究期間

現在の研究活動

1. **組織形成機構と接合メカニズム**
   - 微細粒形成機構の解明
   - FSW時の入熱に関する検討
   - EBSD法を用いた材料流動解析
2. **材料組織と継手特性の関連性調査とこれらの制御**
   - Al合金、Mg合金、Ti合金、鉄鋼、異材接合
   - 硬さ分布、引張特性、靭性、耐食性と材料組織
3. **鉄鋼やチタン（合金）の摩擦攪拌**
4. **鉄鋼やチタン（合金）の摩擦攪拌用接合ツールの開発**
   - Mo基合金、Co基合金
   - ツールコーティングの影響
   - ツール摩耗挙動の解明

科学研究費補助金：2件、共同研究：10件

まとめ

FSW／FSSWは実用化に至っているが、未だに実機適用例は限定的である。自動車産業においては、異材接合への適用、高張力鋼板のFSW／FSSWが今後の課題であろう。そのためには新たなプロセスの開発や安価で信頼性の高い鉄鋼用ツール開発が不可欠である。
その一方、FSW現象や継手組織・特性に関する知見も未だ完全ではない。
更なる研究・開発をとおして、FSWがさまざまな分野へ拡がることを期待したい。

ご清聴ありがとうございました。