

TODAY

Special Steel of Choice

一般社団法人特殊鋼倶楽部

専務理事 小澤 純夫

特殊鋼は、最先端技術の「粋」です。

特殊鋼は、鉄鋼材料の中で独特の高い機能を有する材料で、我が国鉄鋼生産の20%強を占め、自動車をはじめとする輸送機器や産業機械、建設機械、工作機械等幅広い産業分野の中核部品材料として使われています。特殊鋼は、自動車等の性能・安全性を支える重要保安部品に必須であるのみならず、工業製品の製造工程における性能やコスト削減の鍵を握る加工性を左右し、我が国の製造業の競争力の根本を支える重要な素材です。また家庭においてキッチンや家庭器具で広くステンレス鋼が使われるなど、国民経済生活と密接な関係を持つもので、特殊鋼のレベルが国民経済を支えています。

このように重要な特殊鋼ですが、残念ながら世の中に広く認知されているとは言えないのではないのでしょうか。その理由の一つとして、特殊鋼の定義が各国で一定しておらず、時代とともに変遷してきており、また日本でも、機関・会社によって、その内容が異なっていることが挙げられると思います。

経済産業省の統計では、特殊鋼を、「工具鋼」、「構造物鋼」、「特殊用途鋼」（ステンレス鋼、ばね鋼、軸受鋼、快削鋼、ピアノ線材、高抗張力鋼等）としています。これら特殊鋼は、概念として整理すると、「合金鋼及び高級炭素鋼」と言えると思います。「合金鋼」は、炭素鋼に合金成分を意図的に添加して特別の性質を付与した鋼であり明確ですが、「高級炭素鋼」とは何でしょうか？ 普通鋼も炭素鋼ですが、「高級炭素鋼」は、普通鋼に比べて高度の品質が要求され、燐・硫黄等不純物の少ない炭素鋼を言います。普通鋼は、一定の性能（例えば強度）を満たせば成分については厳格な定めがありませんが、「高級炭素鋼」及び「合金鋼」は、高い性能と信頼性が要求され、製錬・二次精錬工程で不純物除去を含めた成分管理が行われた後、「熱処理工程」で魂が吹き込まれた鋼です。鋼は熱処理により大きく性能が変わる特色を有しており、本工程で特殊鋼は本来の性能を発揮します。

もう一つの理由は、目につかないところで活躍していることが挙げられると思います。例えば「工具鋼」は、



工業製品成形の基盤ですが、最終消費者の目に触れる機会はありません。全ての工業製品には形があり、その形を金型や切削工具として産み出す母なる素材が工具鋼で、工業製品の製造工程で用いられ製造コストの鍵を握っています。また、「機械構造用鋼」、「ばね鋼」、「軸受鋼」等は、機械の力を伝える部分に用いられる重要保安部品ですが、機械の内部にあるため目に触れる機会はありません。

特殊鋼倶楽部では、有能な人材を特殊鋼業界に引き寄せるためにも、収益拡大、投資・研究開発の拡大、プレゼンス・競争力の向上といった好循環を実現していくためにも、特殊鋼の認知度を高め特殊鋼のファンを増やしていきたいと考えています。このため、広報誌「特殊鋼」、講演、展示会等の場で特殊鋼のPR活動を実施しています。4月6日～8日に東京ビッグサイトで開催された高機能金属展では、協賛団体となるとともに、専門技術セミナーでの講演、ブース展示等を行いました。また、平成28年度新規事業として、学生向け特殊鋼業界紹介パンフレット・映像コンテンツ作成を実施する予定です。

その際に重要な視点は、「選ばれる特殊鋼 (Special steel of choice)」だと考えています。我が国の特殊鋼業界を巡る環境は、需要面では国内市場の縮小・構造変化と中国の景気減速、供給面では、電気料金等の製造コストの増大、海外特殊鋼メーカーや他素材との競争激化など厳しい状況にあります。既存のマーケットが縮小し浸食されることが避けられない今こそ、日本の特殊鋼業が長年をかけて磨きをかけてきたもの、品質、開発力、提案力やそれら技術を中核としたお客様との信頼関係、これらの真価がこれまで以上に問われる時が来ていると思います。

皆様の特鋼へのご理解、ご支援をお願い申し上げます。

鉄鋼材料の摩擦攪拌接合とツール材料開発

鉄鋼材料研究部長 前田 尚志 主席研究員 吉田 周平

1. はじめに

平成 25 年度よりスタートした国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業未来開拓研究プロジェクト「革新的新構造材料等研究開発」の概要および JRCM の本プロジェクトへの参画状況については過去の JRCM NEWS において概要紹介¹⁾や報告がある^{2,3)}。

本プロジェクトの対象となる技術・材料は、①革新的構造材料(チタン、アルミニウム、マグネシウム、革新鋼板、CFRP)の開発、②これらの構造材料の接合技術開発(同種・異種)、③①および②に関連する戦略・基盤研究から構成されており、技術対象分野は極めて広範囲に及んでいる。

JRCM では上記の③の戦略基盤研究分野において、平成 25、26 年度は 1) 接合技術(金属材料/金属材料)、2) 接合技術(金属材料/CFRP)、3) CFRP 材料(熱可塑性、自動車用途)、4) 金属構造用材料(チタン、アルミニウム、マグネシウム、革新鋼板)の 4 分野における技術動向の調査・分析を実施した。また、平成 27 年度は対象範囲を「金属材料の接合技術」に絞り込んで技術調査を実施した。

本稿では、平成 27 年度に実施した調査の中から、近年注目を集めている摩擦攪拌接合(FSW: Friction Stir Welding)の鉄鋼材料への適用状況とその実用化可否の鍵を握る高融点金属用 FSW ツールの開発状況に関する調査結果についてその概要を紹介する。

2. 摩擦攪拌接合の鉄鋼材料への適用状況

金属材料同士の接合分野において近年特に注目を集めているのが摩擦攪拌接合(FSW)である。FSW は 1991 年に英国の TWI(The Welding Institute) で開発された接合法であり、部材の接合部分に突起部を有した回転するツールを押し当てて摩擦による昇温と共に接合部の攪拌を生じさせて接合する方法である。FSW は固相接合法であるため溶融金属領域が存在しないことから接合部の特性劣化が少ない他、熱投入量が少ない、アークやスパッタを生じないことから接合部の外観が美麗、歪発生量が少ない、シールドガスが不要、等のいくつかの利点を有している。更には、セラミック粒子を表面に分散させる複合材料化手法や摩擦攪拌領域の結晶粒を微細化させる組織制御手法等の表面処理プロセス(FSP: Friction Stir Processing)としても近年注目を集めている。

FSW は固相接合法であり接合部の反応領域が狭いため、異種金属間の接合に適していることから、上

記のプロジェクトにおいても自動車を中心とした部材・部品のマルチマテリアル化に有利な接合方法として重点が置かれている。これまで日本国内において FSW に関する基本特許が TWI より登録されていたが、昨年その有効期限が満了を迎えたことから、今後関連する技術開発が急速に進展する可能性がある。FSW は基本的な突き合わせ接合、重ね合わせ接合、点接合(FSSW: Friction Stir Spot WeldingあるいはFSJ: Friction Spot Joining)の他、ポピンツール型、竜巻型、無回転ショルダ型、等、様々な形態で発展しており、実用化も推進されている。

FSW の実用化状況に関しては、アルミニウムやマグネシウム等の低融点を有する軽金属の接合に関しては既に広く実用化が進んでおり、電車、自動車、航空機、船舶等、多方面の用途で既に幅広く工業製品に適用されている。一方、同種金属、異種金属の接合に関わらず鉄鋼やチタン等の高融点を有する金属の連続接合においては、未だ実用化には至っていない状況にあり、低融点金属と高融点金属における実用化状況には大きな開きがあるのが実情である。鉄鋼材料を含む高融点金属への FSW 適用に関する実用化の実現には、後述するように使用する高温で十分な耐久性を有するツール用材料の開発が必須とされている。

鉄鋼材料では、高温からの冷却に伴い相変態が起こる場合が多いため、FSW においても炭素量を初めとする化学成分、接合温度(ツール回転速度、接合速度、他の接合条件に依存)および冷却速度により様々な生成相(フェライト、セメンタイト、マルテンサイト、ベイナイト、残留オーステナイト、等)並びに結晶粒径を形成するため、生成するマイクロ組織は広範囲に変化し、その形成メカニズムは塑性流動による加工歪も影響して極めて複雑なものとなる。

鉄鋼材料の FSW の連続接合は工業的に実用化の域には達していないが、FSSW は連続接合の場合と比較して到達する温度や保持時間においてツールへの負荷は連続接合より軽減されるため、実用化への障壁は連続接合より低いと考えられる。また、アルミニウムと鉄鋼材料との(アルミニウム側からの)重ね合わせ FSW や FSSW に関しては自動車のサブフレームやトランクリッド部材に各々既に実用化されている。

鉄鋼材料への FSW に関連して、最近日本塑性加工学会主催で「鉄鋼材料への摩擦攪拌接合(FSW)の適用の現状と課題」に関するシンポジウム⁴⁾が開催されたことを参考までに付記しておく。

3. 高融点金属用 FSW ツール材料の開発状況

鉄鋼材料に関して実用化が未達である最大の理由は、接合温度において十分な耐久性を有するツールが開発されていないことである。鉄鋼やチタン等の高融点金属材料における FSW の実用化の成否に関しては、ツール用の材料開発が最も重要な鍵を握っているとと言っても過言ではない。

鉄鋼材料の場合、接合材料が高融点であり、軟化する温度が高温になるため、接合温度が再結晶温度以上となる場合には接合温度は 1000 ~ 1200℃となり、アルミニウムの場合の 400 ~ 450℃と比較すると非常に高温となる。このため、アルミニウムの場合であればツール材質は SKD61 のような工具鋼が工業的に使用され、耐久性も十分であるが、鉄鋼材料の場合のツールにはこれを大きく凌駕するような高温における強度や耐摩耗性を有する材料が必要になる。

例えば、1.2mm 厚の DP980 鋼板の FSSW 後の PCBN(多結晶の立方晶窒化ホウ素)製 FSW ツールの損傷状態の使用回数による変化を調査した報告⁵⁾があるが、使用前のツールはねじ形状のプローブを有しているが、400 回使用後には損耗によりネジ形状が消失し、725 回使用後にはプローブ自体がほとんど消滅することから、FSSW において硬質セラミックスである PCBN を用いた場合でも非常に厳しい摩耗環境であることが想像される。

高融点金属用 FSW ツール材料として要求される特性としては、

- 1) 高温強度 (高温耐摩耗性) : 1000℃において 400MPa 以上の強度を有すること。
- 2) 靱性 : 使用中に割れや欠け等の破損がないこと。
- 3) 低コスト

が挙げられ、この他に接合材料との反応性が低いことも必要である。

高融点金属用 FSW ツール材料の基本特性として耐熱性や耐摩耗性が絶対条件であり、候補材料は、①高融点合金系 (W、Co、Ni、他)、②超硬合金系 (WC-Co)、③セラミックス系 (PCBN、Si₃N₄、他)、④高融点合金 + セラミックス複合系の 4 つに分類される。これらの材料特性に関する比較を表 1 に示す。①や②の「合金系」は、耐熱性・耐摩耗性はあまり高くないが靱性は比較的良好である。一方、③の「セラミックス系」は、耐熱性・耐摩耗性は良好な反面、靱性が乏しい

ために使用中に破損が起りやすい問題があり、これはセラミックス特有の熱衝撃破壊を起こしやすいことに関連していると考えられる。このようにツール材料として要求される「耐熱性・耐摩耗性」と「靱性」は trade-off の関係にある。最近はこれら 2 つの特性バランスの向上を目的として高融点合金の中にセラミックスを分散させた複合型の材料開発が進行中である。一方、耐熱合金の表面にセラミック系硬質膜をコーティングする複合型の開発も進められている。

また、ツールの製造コスト低減は実用化推進のためには工業的に極めて重要な課題である。FSW ツール用材料として一般的な PCBN 製ツールの価格は標準寸法で 1 個約 60 万円であり、大型では更に高価格となる。当面の目標価格は標準寸法で 1 個 10 万円以下とされている。また、特に高価な材料を使用する場合は、価格を抑えるために使用後のツールを回収して再利用することも検討されている。

現在開発が進められている高融点金属用 FSW ツール材料を表 2 に示す。高融点合金系では、Ni、Co、Ir、等を基本とする耐熱合金や金属間化合物を主体としている。セラミックス系では、従来の PCBN と比較して安価な Si₃N₄ の開発も進められているが、耐久性の面では改善の余地があると思われる。前述のように、耐摩耗性と靱性の特性バランスを向上させる観点から高融点金属 + セラミックスの複合材料系が有望視されているが、連続接合の場合は、軽金属における実用化状況と比較すると耐久性とコストに関しては依然として大幅な改善が必要な状況にある。一方、点接合 (FSSW) の場合にはツール材料開発の面でも連続接合よりも障壁は低いと予想される。

また、メカニズムは不明であるが、Co 基の L1₂ 型金属間化合物が高温における強度低下が小さく、特にチタン合金の FSW に適することが報告されている。これは接合材料とツール材料との反応性に関連している可能性がある。更には、高融点金属の接合の場合には接合温度がより高温になることから、接合部へのツール物質が混入する可能性が高くなるため、割れ等以外に異材混入の評価も必要と考えられる。

一方、ツール材料の評価試験は、個々の研究機関で異なった接合条件により実施されているため、正確かつ定量的な比較検討が難しい状況にあることが今回の調査により明らかになった。今後は評価試験条件の標準化が検討されることを期待したい。

4. おわりに

鉄鋼材料への FSW 適用に関する実用化への期待は非常に大きく、国内外で研究開発が活発に行われている。昨年、筆者の 1 人は FSW を開発した TWI の本部 (Cambridge) とテクノロジーセンター (Yorkshire) を訪問する機会を得て、TWI においても FSW の鉄鋼材料への適用に

表 1 高融点金属用 FSW ツール用材料の種類と特性

材料	耐摩耗性	靱性(耐割れ性)	コスト
1. 高融点合金系(W、Co、Ni、他)	×	○	○
2. 超硬合金系(WC-Co、他)	△	△	△
3. セラミックス系(PCBN、Si ₃ N ₄ 、他)	○	×	× _(PCBN) /○ _(Si₃N₄)
4. 高融点合金 + セラミックス複合系	△~○	△~○	△

表2 高融点金属用FSW ツール用材料の代表例と特徴

材料系	材料名	研究開発機関	接合状況	コスト情報
高融点合金	Co基合金 (Co ₃ (Al,W)分散)	東北大、日立製作所、 日立メタルプレジジョン	SUS304で総接合長10数m可能。 チタン・チタン合金との相性が良好。	標準：7万円/個 大型：10万円/個
高融点合金	Ir添加Ni基超合金	東北大、田中貴金属	SUS304のビードオンプレートFSW1.8m試験 後のツール形状プロファイルに変化なし。	
高融点合金	Ir基合金 (Ir-10Re合金)	大阪大、フルヤ金属	SUS304で総接合長75m可能。	PCBNとほぼ同等
高融点合金	Ni基超々合金 (5Ta+3Re添加)	大阪府立大、アイセル	SUS430(α系)で総接合長20m可能。	目標価格20万円/個
超硬合金	WC-Co	(標準汎用品)	スポットでDP980鋼に対して7000打点可能。	
硬質セラミックス	PCBN(多結晶立方窒化ホウ素)	(標準汎用品)	標準的な材料も使用中に割れる問題あり。 厚板向けのニーズ増加により大型化進行中。	標準：60万円/個 大型：100万円以上/個
セラミックス	Si ₃ N ₄	広島県立総研、東芝 マテリアル	SUS304で総接合長10m程度可能。FeとSiが 反応して摩耗する問題あり。	標準：1万円/個
セラミックス	Si ₃ N ₄	大阪大、総合車両研 究所、フルヤ金属	SPCC(1.6mm厚)で接合速度3m/min達成。 SUS304(1.5mm厚)で接合速度1m/min達成。	
高融点合金+ セラミックス系	(W+セラ)にセラ コーティング	東北大、アライドマテリ アル	γ系ステンレス鋼にて接合深さ4mm、長さ 10m以上可能。	目標価格：10万円/個
高融点合金+ セラミックス系	W-Re合金+ PCBN(60-80%)	MegaStir(米国)	SUS304で総接合長70m程度可能。	

関する研究開発は継続して精力的に進められていることを実際に確認することができた。但し、TWIにおいては、ツール材料の開発は行われていない。

FSWの鉄鋼材料への適用に関する実用化に関しては、ツールの高温における耐久性向上を始めとして克服すべき課題は依然として多く、軽金属の状況と比較して大きな開きがあるのが現状である。しかし、実用化が実現できれば、980MPa級を超えるハイテン材同士の接合は元より鉄鋼材料と非鉄金属に代表される異材接合への適用展開も容易になり、自動車用途を始めとする構造部材のマルチマテリアル化へ

の波及効果も非常に大きいことから、今後の動向が大いに注目される。

参考文献

- 1) JRCM NEWS：2014年1月号(No.327)
- 2) JRCM NEWS：2014年8月号(No.334)
- 3) JRCM NEWS：2014年9月号(No.335)
- 4) 第318回塑性加工シンポジウム予稿集(日本塑性加工学会、2016年2月24日)
- 5) N.Saunders, et al., Int.J.Precis.Eng.Manuf., 15(2014), No.5, P841.

お知らせ

【人事異動】

○平成28年4月15日付け
松沼 健二
[旧] 非鉄材料研究部 主席研究員
[新] 住友電気工業株式会社
○平成28年4月16日付け
岡久 拓司
[旧] 住友電気工業株式会社
[新] 非鉄材料研究部 主席研究員

【新人紹介】

- ① 出生地 ② 生年月日 ③ 最終学歴
④ 職歴 ⑤ 仕事に対する期待 ⑥ 趣味、特技、資格等



岡久 拓司
(おかひさ たくじ)

- ① 静岡県御殿場市
② 1970年2月生れ
③ 筑波大学工学研究科修士卒
④ 1994年住友電気工業株式会社に入社。研究開発部門にて青紫色LDやLED用途の窒化ガリウム基

板の研究開発に従事。以降も一貫して半導体関係で2007年より事業部で窒化ガリウム量産開発、2010年から研究開発部門にて窒化ガリウムやダイヤモンドの研究開発に従事。
⑤ 企業の利益メインの考えから、視野を拡げて日本産業の発展に貢献できるように全力で仕事に取り組みたい。
⑥ 史跡や博物館巡り

The Japan Research and Development Center for Metals

JRCM NEWS / 第355号

内容に関するご意見、ご質問は JRCM 総務企画部までお寄せください。
本書の内容を無断で複写・複製・転載することを禁じます。

発行 2016年5月1日
発行人 小紫正樹
発行所 一般財団法人 金属系材料研究開発センター
〒105-0003 東京都港区西新橋一丁目5番11号 第11 東洋海事ビル6階
TEL (03)3592-1282 (代) / FAX (03)3592-1285
ホームページ URL http://www.jrcm.or.jp/
E-mail jrcm@oak.ocn.ne.jp