

# TMS 2023 152<sup>nd</sup> Annual Meeting & Exhibition

大阪大学 接合科学研究所

助教 山本 啓

(2022 年度 国際会議等参加助成 (若手研究者枠) AF-2022040-Y1)

キーワード：TMS, San Diego, 摩擦攪拌接合, 摩擦攪拌プロセス, ツール摩耗, 超硬合金, 低炭素鋼, 固溶

## 1. 開催日

2023 年 3 月 19～23 日

か国から 4,000 人を超える技術者・科学者が集まり、学際的な交流が行われる。本会議における講演は、以下の 15 のテクニカルトラックに大別される。

## 2. 開催場所

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 サンディエゴ, San Diego Convention Center / Hilton San Diego Bayfront



図 1 会場の San Diego Convention Center の入口。

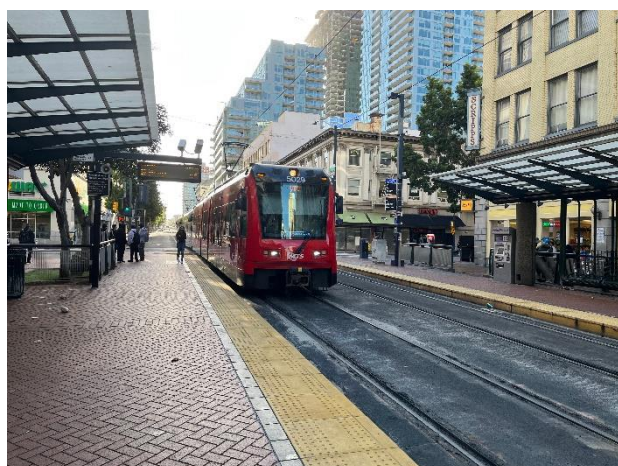


図 2 San Diego Trolley. 市街地周辺は交通網が発達しているため、会場まで容易に向かうことができる。

## 3. 会議概要<sup>1)</sup>

本会議は、鉱物、金属、材料に関する専門組織 The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)が北米で毎年開催する世界最大規模の国際会議である。例年、約 70

- Additive Technologies
- **Materials Processing**
- Mechanics & Structural Reliability
- Nuclear Materials
- Physical Metallurgy
- Light Metals
- Characterization
- Nanostructured Materials
- Advanced Materials
- Electronic Materials
- Energy & Environment
- Biomaterials
- Materials Design
- Corrosion
- Special Topics

各テクニカルトラックは、2～14 のシンポジウムで構成され(合計 119), その多くが同時進行で 4 日間開催された。それとともに、基調講演、ポスターセッション、授賞式、企業による展示会、ネットワークングイベント、学生及び若手技術者・研究者イベント、ワークショップなども行われた。

著者は、TMS Annual Meeting & Exhibition に、2017 年と 2019 年の過去 2 回参加しており、今回が 4 年ぶり 3 回目の参加となった。上記のテクニカルトラックのうち、「Materials Processing」内で企画されたシンポジウム「Friction Stir Welding and Processing XII」にて講演を行った。当該シンポジウムでは、摩擦攪拌接合(Friction stir welding: FSW)/プロセス(Friction stir processing: FSP)及びその派生技術や、関連する評価・検査技術について、以下の 8 セッションが行われた。

- Additive Friction Stir Deposition
- **Friction Stir Processing**
- Modeling & Validation
- FSW of High Melting Temperature Materials
- Spot Technologies
- Tooling & Process Monitoring

- Dissimilar & Non-Ferrous
- Derivative Technologies

近年の流行を反映して、摩擦攪拌技術を応用した固相積層造形プロセスに関する講演が多数みられたほか、FSP/W部における高度な組織解析やモデリング/シミュレーション、最新のプロセスモニタリング/非破壊検査技術の紹介など、合計 56 講演が行われた。このように、摩擦攪拌技術に特化したセッションを連日に渡って開催するのは世界的にみても珍しく、当該分野における最先端の研究を存分に見聞することができる絶好の機会であった。

#### 4. 発表概要<sup>2)</sup>

上記のセッションのうち、著者は「Friction Stir Processing」にて“Surface Alloying Due to WC Tool Wear during FSP and Its Effects on the Microstructure and Mechanical Properties of Topmost Steel Layer”という題目で講演を行った。講演内容の概要を以下に示す。

FSP は、高速回転させたツールと呼ばれる棒状工具を材料表面に押し付けることで生じる摩擦熱と塑性変形を利用した FSW の応用技術であり、施工面表層組織を固相状態のまま動的再結晶により微細化・均質化することが可能である。鉄鋼材料のような高強度の金属材料へ FSP/W を適用する場合、施工時の温度上昇が大きいため、耐熱合金やセラミックス材料のような高温特性に優れた材質のツールが採用される。しかし、FSP/W 中のツール摩耗は依然として不可避な問題であり、施工品質を維持するうえで大きな障害となっている。一方で、著者らはツール摩耗によってポジティブな効果が得られるという新展開をこれまでの TMS Annual Meeting & Exhibition にて示してきた。具体的には、炭化タングステン(WC)ツールを用いた低炭素鋼溶接継手への高入熱 FSP において、ツールを構成する主要元素である W や C などが施工面表層に固溶し、その領域において著しい硬さ上昇と圧縮残留応力発生が起こることを明らかにしてきた。そこで本講演では、ツール元素が FSP 中にどのようにして鋼中に固溶し、その濃度変化に応じてどのような組織形成・力学的挙動を示すか、機構解明を試みた成果について報告した。

まず、WC ツール元素の鋼中固溶機構の解明にあたり、FSP 中のツール/鋼界面を観察するため、ストップアクション法による凍結試料の作製を試みた。具体的には、水槽内に設置した低炭素鋼板への FSP 途中でツールの移動と回転を急停止させ、それと同時に水を流し込むことにより、ツールを鋼中に埋め込んだままその周辺での組織変化を急冷・凍結させた。得られたツール/鋼界面からは、鋼側の Fe 元素がツール側の Ni 基バインダー内へと拡散するとともに、WC 粒子との反応によって Fe<sub>4</sub>W<sub>2</sub>C 層の形成が観察された。透過電子顕微鏡による観察の結果、摩擦による著しいせん断変形が生じていると思われる Fe<sub>4</sub>W<sub>2</sub>C/鋼界面において、両者の元素が約 100 nm 程度の幅で移動し

ていることがわかった。したがって、Fe<sub>4</sub>W<sub>2</sub>C が機械的に W と C に分解されるとともに、それら元素が鋼側のオーステナイト中へ多量に固溶し、ツール通過後の冷却に伴いオーステナイトがマルテンサイト変態するという過程を踏んで、施工面が形成されると結論付けた。また、界面近傍では Fe<sub>4</sub>W<sub>2</sub>C 層の粒子が鋼側へ離脱する様子も捉えており、固溶層の領域拡大には FSP の攪拌効果によるそれら粒子の溶解の加速と、塑性流動を介した広範囲に及ぶ元素の移動が大きな役割を担っていることを明らかにした。

続いて、固溶層における圧縮残留応力発生機構の解明にあたり、ツール回転速度の調整により種々の濃度でツール元素を固溶させた FSP 施工面に対し、X 線を用いた残留オーステナイト相分率と残留応力の測定、ならびにそれら各測定点直下にて元素濃度測定を行った。通常の FSP の場合には、材料中への局所的な入熱によって冷却過程での熱収縮に伴う引張残留応力が発生するが、圧縮残留応力が発生するためにはその冷却過程にて施工面が膨張する必要がある。その膨張はマルテンサイト変態時に生じる膨張と考えられ、残留応力に対して有効な膨張量を支配するマルテンサイト変態開始温度(Ms 点)に着目した。Ms 点は鋼中の固溶元素量に依存しているため、各測定点における元素濃度を用いて計算し残留応力との関係を求めた結果、Ms 点が 150°C 近傍で圧縮の最大値を示すことがわかった。Ms 点が低下(ツール元素固溶量が増加)し、室温付近にてマルテンサイト変態が完了する場合に膨張量が最大化され、残留応力は引張から圧縮へと遷移する。一方、Ms 点が 150°C 以下の施工面では、残留オーステナイト相分率が増加する傾向がみられ、室温でのマルテンサイト変態が未完了となったことでそれに伴う膨張量が不十分となり、引張残留応力が生じると結論付けた。また、ツール元素固溶量が大きな施工面表層では、FSP 時の冷却過程で変態できなかった多量の残留オーステナイトが、引張応力負荷時や疲労き裂近傍の塑性域において加工誘起マルテンサイト変態を生じ、疲労特性に対して有効に作用することを確認しており、変態膨張量不足によって生じた引張残留応力の影響は無視できるものと考えている。

#### 謝 辞

本国際会議への参加にあたり、公益財団法人 天田財団より 2022 年度国際会議等参加助成(若手研究者枠)を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) TMS 2023 Annual Meeting & Exhibition, <https://www.tms.org/AnnualMeeting/TMS2023>, 2023 年 4 月 5 日参照。
- 2) Hajime Yamamoto, Yudai Imagawa, Kazuhiro Ito, Ke Chen, Lanting Zhang: Journal of Manufacturing Processes, 69 (2021) 311-319.