

令和元年9月9日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H04133

研究課題名(和文)母材を大幅に凌ぐ高強度・高延性継手を達成するツールレス新規摩擦接合技術の確立

研究課題名(英文)Development of New Tool-less Friction Joining Method

研究代表者

藤井 英俊 (Fujii, Hidetoshi)

大阪大学・接合科学研究所・教授

研究者番号：00247230

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：回転ツールを用いずに材料同士を摩擦させながら接合する手法において、界面近傍まで素材の温度上昇を抑制、すなわち素材の強度低下を抑制することに成功し、回転ツールが不要な新規接合技術を確立した。無変態で接合が行われることにより、接合界面で微細に再結晶した組織が得られ、継手効率が100%の接合体を得ることに成功した。摩擦圧接に加えて、直線的な駆動をする線形駆動摩擦接合システムを構築し、適用範囲の拡大を図った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

回転ツールを用いずに材料同士を摩擦させながら接合することで、100%の継手効率を得る手法を確立した。特に、印加圧力によって、接合温度を任意に制御できることを発見したのは特筆に値し、A1点以下の温度で接合が可能となった。これにより、フェライトと球状セメンタイトからなる組織が得られ、強度ならびに靱性の良好な継手が得られる。炭素量に関係なく、鉄鋼材料を接合可能にするこれらの技術の産業界への波及効果は大きいと言える。

研究成果の概要(英文)：A new welding method by rubbing the materials without using the rotating tool has been developed by succeeding in suppressing the temperature rise of the material at the vicinity of the interface, that is, suppressing the decrease in strength of the material. By performing joining without transformation, a finely recrystallized structure was obtained at the interface, and a joint having 100% joint efficiency was successfully obtained. In addition to the friction welding, a linear driven friction welding system was constructed to expand the scope of application.

研究分野：接合科学

キーワード：接合 ものづくり 材料加工・処理 金属生産工学 構造・材料 組織制御 表面・界面制御 可視化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

摩擦攪拌接合 (FSW)、摩擦圧接、線形摩擦接合などの摩擦を利用した接合技術は、昨今の環境・エネルギー問題を背景に、世界各国で勢力的に研究開発が進められている。これらの方法では、一般に接合温度が融点以下で、被接合材を固相状態に維持したまま接合が行われるため、従来法の溶融溶接法と比べて優れた特性が得られるのが特徴である。

特に、高速で回転するツールを被接合材に押し当て、その際に発生する摩擦熱を利用して接合する FSW は、Al 合金製の構造物に対しては、既に幅広い産業分野で適用されている。しかしながら、鉄鋼材料に対しては、十分なツールの耐久性が得られておらず、ほとんど実用化されていないのが現状である。

FSW と類似とされる技術に摩擦圧接がある。摩擦圧接は、円柱状あるいは円筒状の部材を接合する技術で、片側の部材を高速で回転させ、固定された部材に押し付け、その際に発生する摩擦熱によって接合する技術である。また、同様な方法で、試料を荷重方向に垂直に駆動させる線形摩擦接合がある。この方法は、回転を使用しないため、円柱や円筒などの軸対象の材料でない板材のような材料を対象とすることができる。

2. 研究の目的

回転ツールを用いずに材料同士を摩擦させながら接合する接合法において、界面近傍まで素材の温度上昇を抑制、すなわち素材の強度低下を抑制することで、接合界面に大きな加工ひずみを導入することにより、回転ツールが不要な新規接合技術を確立する。これにより、加工組織からなる高強度な界面構造を有する接合体が得られる。加えて、この技術を発展させ、界面における強ひずみ加工を加えることによってオーステナイトの安定化を図り、本来、室温ではオーステナイトが残存しない組成の鉄鋼材料に対しても TRIP 効果*を生じさせ、1000MPa 以上の強度と 80% 以上の伸びという、元の素材にない特性を発現させる新規接合技術を確立する。

3. 研究の方法

(1) ツールレス新規摩擦接合法の開発

本研究では、摩擦圧接、線形摩擦接合の原理を活用しつつ、素材の強度を接合界面近傍まで保つことにより、駆動系のエネルギーを界面近傍に十分に伝え、巨大ひずみを十分に付与することにより、界面強度の向上を達成可能なツールレス新規摩擦接合法を開発する。必要に応じて、液体 CO₂ などの冷媒を界面に吹きかけ、材料を冷却させることにより、界面近傍まで素材の温度上昇を抑制、すなわち材料の強度低下を抑制することで、界面近傍まで大きな塑性ひずみを導入し、接合界面において加工組織を維持したまま、高強度な界面を得る。

(2) 接合条件の最適化

低温摩擦圧接では、摩擦圧力、アップセット圧力、摩擦時間、回転速度、しゅう動速度などの接合パラメータの最適化を行う。制御方式としてはブレーキ式、摩擦時間の制御方法は時間制御とする。継手の微細組織の観察や硬度分布などの機械的特性の評価によって、最適化を行う。円柱あるいは円筒のみでは試料形状に制限されるため、回転ではなく、直線的な駆動をする低温線形駆動摩擦接合法も併せて開発する。ひずみの導入によるオーステナイトの安定化に対しても取り組み、TRIP 効果が発現する手法及び条件を求める。

(3) Fe-C-Mo 鋼を用いて、強ひずみ加工によるオーステナイト安定化現象を活用した、高強度・高延性鋼構造化技術を確立する。一般に C 量が増加すると、オーステナイトの残留が促進される。また、著者らの先行研究で、ひずみ (加工) を付与するとオーステナイトが安定化し (Ms 点が低下し)、オーステナイトの残留が促進されることが明らかとなっている。そこでこの現象を活用し、接合中と同様にひずみを付与した状態で残留オーステナイトを得るために必要な炭素量や合金元素量を明確にする。

一方、ひずみを付与した状態では転位密度が増加し、構成元素の拡散速度が増大することによってフェライト/ベイナイトも生成しやすくなると考えられる。したがって、拡散変態を抑制する効果のある Mo を添加することでこれを達成する。すなわち、オーステナイトを残留させるために必要な Mo 量を決定する。

4. 研究成果

本研究で得られた最も大きな成果は、以下の 2 つである。

(1) 低温摩擦圧接を開発することで、回転ツールの耐久性の問題で実用化に至っていない FSW に代わる新規接合技術を開発した。本手法では、FSW 並みあるいは、それを超える界面強度を有する継手を得ることができる。また、低温線形摩擦接合法を併せて開発することで、試料の形状を円柱、円筒などの軸対象形状だけでなく、板状の材料も接合可能とした。

(2) 一般に、摩擦攪拌接合では、ツールに加える印加圧力を増加させると温度が増加するが、摩擦圧接、線形摩擦接合では、逆に、試料に加える圧力を増加させると接合温度が低下することを明らかにした。印加圧力によって、接合温度を制御することを可能となり、S45C 鋼や SK5 鋼などの中高炭素鋼を A_1 点以下で接合することに成功した。この方法を用いると、被接合材の強度の温度依存性が分かれば、任意に接合温度を決定できる。

(3) SCM420 鋼 (0.20 wt.%C-1.07%Cr-0.16%Mo-0.24% Si-0.61%Mn) を摩擦接合を行うことで、オーステナイトが残留し、強度および伸びとも母材を上回る現象が発現することを実験的に確認した。

(4) オーステナイトを室温で残留させるためには、以下の 2 つの条件を同時に満たす必要がある。

オーステナイトの強加工により、 M_s 点を低下させ、マルテンサイトの生成を抑制する。(図 1(a))

ノーズを右側へシフトさせ、フェライトおよびベイナイトの生成を抑制する。(図 1(b))

加工による転位密度が増大によってオーステナイトが安定化する一方で、転位密度が増加すると、拡散変態も促進され、すなわち、ノーズが左側へシフトする。したがって、拡散変態も抑制しなければ、オーステナイトを残留させるという目標は達成できない。

C は M_s を低下させるための元素であり、Mo はひずみによって、左側へシフトしたノーズを右側へシフトさせ、フェライト/ベイナイトの生成を抑制するための元素である。(図 1 参照) 上述の鋼材では、特にオーステナイト安定化元素は含まれないため、多くのオーステナイトが残留ことが注目される。

本手法では、巨大なひずみ(加工)の導入によって、本来、不安定なオーステナイトを安定化させ、かつ、拡散変態を抑制することによって、極めて優れた機械的特性を得ることのできる技術を確立するところに革新性がある。本手法を用いると、変形時の衝撃吸収エネルギーも極めて大きく、最終的な強度も高い構造体が得られるため、例えば、自動車部材の接合に用いた場合には、衝突安全性を大幅に向上させることが可能になるなど、社会に与えるインパクトは大きいと言える。

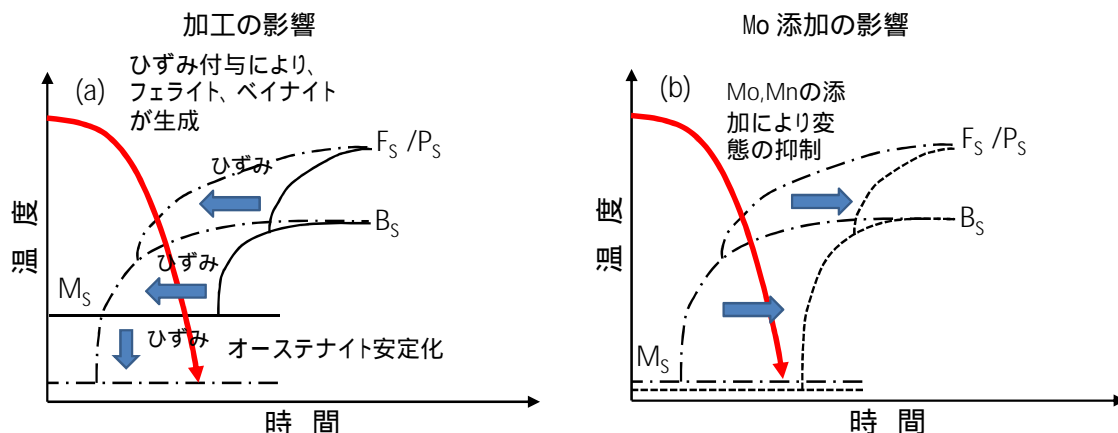


図 1 炭素鋼の CCT 線図 (a)加工の影響、(b) Mo 添加の影響

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

Aoki Yasuhiro, Kuroiwa Ryosuke, Fujii Hidetoshi, Murayama Gen, Yasuyama Masanori, Linear Friction Stir Welding of Medium Carbon Steel at Low Temperature, ISIJ International, 査読有, Vol.59, 2019, 掲載決定.

Kuroiwa Ryosuke, Liu Huihong, Aoki Yasuhiro, Yoon Sungook, Fujii Hidetoshi, Murayama Gen, Microstructure control of medium carbon steel joints by low-temperature linear friction welding, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol.24, 2019, 1-9.

DOI: 10.1080/13621718.2019.1600771

青木 祥宏、黒岩 良祐、藤井 英俊、村山 元、泰山 正則、中炭素鋼の低温線形摩擦攪拌接合、鉄と鋼、査読有, 109 巻、2017、422 ~ 428

DOI: 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2016-109

T. Miura, R. Ueji, H. Fujii, T. Murakami and T. Kobashi, Stability of the Retained Austenite in Low-alloyed Transformation Induced Plasticity-Aided Steels during Friction Stir Welding, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有, Vol.21, 2016, 281-286.

〔学会発表〕(計 35 件)

H. Fujii, Welding of Steel below A1 by Linear Friction Welding, 4th International Conference on Welding and Failure Analysis of Engineering Materials (WAFAM-2018), Aswan, Egypt (2018.11.19-22) (招待講演) (国際学会)

藤井 英俊、摩擦接合を利用した 2 つの新規接合方法の開発-FSW と LFW-、軽金属国際ワークショップ「Meet Fraunhofer!」～日独の産学連携最前線：マルチマテリアル接合～、大阪大学 (2018.12.7) (招待講演) (国際学会)

藤井 英俊、青木 祥宏、低温線形摩擦接合、一般社団法人摩擦接合技術協会平成 30 年度第 3 回研究会、愛知県産業科学技術総合センター/産業技術センター (2019.2.4) (招待講演)

H. Fujii and Y. Aoki, No-Transformation Welding of Steel-Friction Stir Welding and Linear Friction Welding, 12th Int. Symp. on Friction Welding, Quebec, Canada (2018.6.26-28) (国際学会)

T. Inagaki, Y. Aoki and H. Fujii, Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V Alloy and SUS316L Stainless Steel, 5th Linear Friction Welding Symp., Cambridge, UK (2019.3.20-21) (国際学会)

Y. Aoki and H. Fujii, Low Temperature Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V Alloy, 5th Linear Friction Welding Symp., Cambridge, UK (2019.3.20-21) (国際学会)

H. Fujii, Latest Welding for High Strength and Toughness -Friction Stir Welding and Linear Friction Welding of Steel without Transformation, 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Brazil (2017.12.3-8) (招待講演) (国際学会)

Y. Aoki and H. Fujii, Relationship between Flash Behaviour, Material Strength and Upset Distance in Four Phase during LFW, 4th Int. Linear Friction Welding Symp. Cambridge, UK (2017.3.16-17) (国際学会)

Y. Aoki, R. Kuroiwa and H. Fujii, Flash Behavior during Linear Friction Welding, International Conference in Africa and Asia, Luxor, Egypt (2015.11.2-5) (招待講演) (国際学会)

他 2 6 件

〔産業財産権〕

出願状況 (計 12 件)

名称：金属材の固相接合方法及び固相接合装置

発明者：藤井 英俊、森貞 好昭、劉 恢弘、青木 祥宏、釜井 正善

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：PCT/2019/006719

出願年：2019

国内外の別： 国外

名称：線形摩擦接合用固定冶具

発明者：藤井 英俊、森貞 好昭、青木 祥宏

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2019-030186

出願年：2019

国内外の別： 国内

名称：固相接合用鋼、固相接合用鋼材、固相接合継手及び固相接合構造物

発明者：藤井 英俊、潮田 浩作、柳楽 知也、森貞 好昭、青木 祥宏

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2019-044618

出願年：2019

国内外の別： 国内

名称：固相接合用耐候性鋼、固相接合用耐候性鋼材、固相接合構造物及び固相接合方法

発明者：藤井 英俊、潮田 浩作、柳楽 知也、森貞 好昭

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2019-044619

出願年：2019
国内外の別： 国内

名称：鉄鋼材の表面改質方法及び鉄鋼構造物

発明者：藤井 英俊，森貞 好昭，青木 祥宏

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2019-060873

出願年：2019

国内外の別： 国内

名称：摩擦接合方法

発明者：藤井 英俊，他2名

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2017-532363

出願年：2017

国内外の別： 国内

名称：線形摩擦接合方法及び線形摩擦接合装置

発明者：藤井 英俊，他 3 名

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：PCT/JP2018/003390

出願年：2017

国内外の別： 国外

名称：線形摩擦接合方法

発明者：藤井 英俊，他 3 名

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：PCT/JP2018/003391

出願年：2017

国内外の別： 国外

名称：線形摩擦接合方法

発明者：藤井 英俊，他 3 名

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：PCT/JP2018/003392

出願年：2017

国内外の別： 国外

名称：摩擦圧接方法

発明者：藤井 英俊，他 2 名

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：、PCT/JP2018/009202

出願年：2017

国内外の別： 国外

名称：摩擦接合方法

発明者：藤井 英俊，他2名

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2017-532363

出願年：2017

国内外の別： 国内

名称：摩擦接合方法

発明者：藤井 英俊，上路 林太郎，森貞 好昭

権利者：大阪大学
種類：特許
番号：特願 2015-152112
取得年：2015
国内外の別： 国内

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

<http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~dpt9/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：上路 林太郎
ローマ字氏名：(UEJI, rintaro)
所属研究機関名：大阪大学
部局名：接合科学研究所
職名：准教授
研究者番号（8 桁）： 80380145