

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360314

研究課題名(和文) 鉄鋼・チタン合金用汎用FSWツール確立に向けたツール損傷学理の究明

研究課題名(英文) Systematic understanding on FSW tool damage for development of practical FSW tool for steels and titanium alloys

研究代表者

佐藤 裕 (Sato, Yutaka)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00292243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：鉄鋼およびチタン合金の摩擦攪拌接合(FSW)を汎用技術として普及させるため、接合ツールの損傷機構ならびにツール損傷を支配する材料因子に関する基礎知見を得た。その結果、ツール損傷を効果的に抑制しうるツール材の材料因子は、耐熱温度が高いこと、2～5μm程度の硬質相を多く含むことであった。これらを満たすツール材を設計・試作し、FSW試験を実施した結果、既存の接合ツールよりも1.5倍の長寿命化を達成できた。

研究成果の概要(英文)：To widely use friction stir welding (FSW) of steels and titanium alloys in the practical applications, fundamental knowledge on damage mechanism of welding tool during FSW and tool material factors governing tool damage attempted to be obtained. The suppression of the tool damage was achieved by both enhancement of high-temperature strength and distribution of large number of hard phases with average size of 2 to 5 micrometers. The tool material designed so as to meet these requirements exhibited 1.5 times longer tool life than the present tool material.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：摩擦攪拌接合 接合ツール Co基耐熱合金 ツール損傷

1. 研究開始当初の背景

摩擦攪拌接合 (FSW) は数多くの利点を有する固相接合法であり、近年、鉄鋼やチタン合金への基礎・応用研究が広く行われている。しかし、これまで汎用技術として用いられたことはなく、実用化の検討も行われていない。鉄鋼・チタン合金 FSW の実用化を阻害している最大の要因は「過酷で特殊な FSW 環境 (高温、大荷重、高ひずみ速度) に耐える安価で長寿命な接合ツールがない」ことにある。接合ツールの寿命は、破断、変形、摩耗といった接合時の損傷と密接に関連するため、ツール損傷を最小にするには「FSW 環境でのツール損傷機構」さらには「ツール損傷に影響する物性」を学術的に理解する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、安価で長寿命な接合ツールの汎用化を目指し、本研究グループにより開発された新規 Co 基耐熱合金ツールにおける FSW 環境でのツール材損傷機構に関する基礎学理を究明することを目的とした。すなわち、Co 基耐熱合金ツールを用いて「ツール損傷はいかなる材料物性に支配されるのか？」と「FSW 過程でどのような損傷が進むのか？」を材料学的に解明し、長寿命なツール材に要求される材料物性・ミクロ組織を合金設計により作り出すための学理を究明し、安価で長寿命な接合ツール開発に資する普遍的な指導原理を確立することを目指した。

3. 研究の方法

(1) ツール損傷メカニズムの検討：FSW 試験により損傷を受けた Co 基耐熱合金ツールの断面組織を、種々の損傷段階で調べ、摩耗機構に関して検討した。

(2) ツール損傷を支配するツール材物性およびミクロ組織の調査：耐熱温度、耐摩耗性を変えた複数の Co 基耐熱合金を合金設計し、高周波溶解・重力鋳造法にて試作した。試作した Co 基耐熱合金自体の γ' 相の固相線温度、高温圧縮強度、室温耐摩耗特性、室温硬さを評価した。同時に試作した Co 基耐熱合金を用いて接合ツールを製作し、種々の鋼板に対して FSW 試験を行い、FSW に伴うツール形状変化を計測してツール損傷に関する定量的なデータを得た。そして、Co 基耐熱合金自体の物性と FSW 時のツール損傷度の関係について検討し、ツール損傷を支配する Co 基耐熱合金の物性・ミクロ組織に関する知見を得た。

(3) ツール材物性およびミクロ組織最適化による長寿命ツールの試作・評価：上記の検討結果に基づき、ツール損傷が起こりにくい材料物性とミクロ組織を有する Co 基耐熱合金を合金設計した。この Co 基耐熱合金の高温材料物性とミクロ組織を評価するとともに、接合ツールに加工して鉄鋼の FSW 試験

に供し、接合ツールの長寿命化について検証した。

4. 研究成果

(1) ツール損傷の定量化：Co 基耐熱合金ツールを用いて、FSW 試験を実施した結果、主にツールショルダ部の摩耗により損傷が進行することが示された。そこでツールショルダ部の摩耗現象のみに着目し、単位摺動距離当たりのショルダ摩耗量を「ショルダ摩耗率」と定義し、ツール損傷度の定量化として利用することとした。

(2) ツール温度とツール損傷の関係：種々の FSW 条件で接合試験を実施する過程で、接合時のツール温度をショルダ面から 0.5mm の位置で K 型熱電対を用いて測定した。FSW 試験において、ツール回転速度を低下させることにより、ツール温度を下げることで、またツール先端部にアルゴンガスを吹き付けることにより更なるツール温度低下が可能となった。種々の FSW 条件におけるショルダ摩耗率を定量化した結果、ツール温度の低下とともにショルダ摩耗率は著しく低下した。試作した Co 基耐熱合金は γ/γ' 組織を有するが、 γ' 相の固相線温度は試作合金ごとに異なるため、ツール温度 (T_{tool}) を γ' 相の固相線温度 ($T_{\gamma'}$) で規格化し、ショルダ摩耗率と $T_{\text{tool}}/T_{\gamma'}$ の関連性を調べた。その結果、図 1 に示すように、 $T_{\text{tool}}/T_{\gamma'}$ が 0.9 まではショルダ摩耗率は低い値であったが、それ以上ではショルダ摩耗率が急激に増加した。この結果から、ツール温度が γ' 相の固相線温度に達したときにツール摩耗が急激に進行することが示唆された。

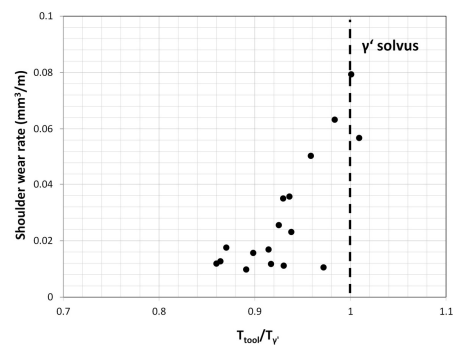


図 1 ツール損傷に及ぼすツール温度の影響

(3) ツール温度が高い場合の摩耗メカニズム： $T_{\text{tool}}/T_{\gamma'}$ が 0.9 以上でツール摩耗が急激に進行したため、この状況下での摩耗メカニズムを調べる目的で摩耗損傷を受けた Co 基耐熱合金ツールの断面組織を材料学的に解析した。ツール温度が高く $T_{\text{tool}}/T_{\gamma'}$ が 0.9 以上では、ショルダ面近傍のミクロ組織は初期組織に比べて著しく微細化していることが示された。結晶粒が微細化した領域の幅はショルダ摩耗率が高いツール表面ほど広いことが分かった。また、この領域における γ' 相の存在を電子顕微鏡により調べた結果、 γ' 相は存

在しておらず、完全に γ 単相組織となっていた。以上の結果から、ツール温度が高い場合には、 γ' 相の固相線温度を超えるため、 γ' 相が固溶して γ 単相となり、高温強度の著しい低下に起因して塑性変形した結果、 γ 単相が再結晶することが示唆された。また、軟化して再結晶した γ 単相組織は被接合材との接触により機械的に摩耗損傷することが示唆された。

(4) ツール温度が高い場合のツール損傷を支配するツール材物性とミクロ組織： γ' 相の固溶に伴ってツール摩耗が生じる状況下において、ツール摩耗量を支配するツール材物性とミクロ組織を調べるため、ショルダ摩耗率とCo基耐熱合金自体の γ' 相の固相線温度、高温圧縮強度、室温耐摩耗特性、室温硬さの関連性について検討した。その結果、ショルダ摩耗率は高温強度が高いほど、また γ' 相の固相線温度が高いほど減少する傾向が示された。

(5) ツール温度が低い場合の摩耗メカニズム： $T_{tool}/T_{\gamma'}$ が0.9以下ではツール摩耗はあまり進行しなかった。実利用を考慮した場合にはツール摩耗があまり進行しない状況下での長寿命化が必要であるため、ツール温度が低い場合の摩耗メカニズムについて検討した。上記(3)と同様に、摩耗損傷を受けたCo基耐熱合金ツールの断面組織を調べた結果、 γ 母相組織は初期組織とほぼ同じであり、ツール表面近傍においても γ' 相の存在が確認できた。ツールの極表面には γ' 相の少ない領域も観察でき、またCo基耐熱合金と鉄鋼の拡散接合試験においてCo基耐熱合金の合金元素と鉄の相互拡散が見られたことから、ツール温度が低い場合には、ツール温度下でCo基耐熱合金と鉄鋼の接触により合金元素の拡散が生じ、ツール極表面領域でのみ γ' 相が安定的に存在しうる組成から外れてしまうため、局部的に γ 相の軟化が生じて摩耗が生じる可能性が示唆された。

(6) ツール温度が低い場合のツール損傷を支配するツール材物性とミクロ組織： γ' 相が存在している状況下において、上記(4)と同様にツール損傷を支配するツール材物性とミクロ組織について検討した。その結果、ショルダ摩耗率はCo基耐熱合金自体の γ' 相の固相線温度、高温圧縮強度、室温耐摩耗特性、室温硬さのいずれともよい相関性を示さないことが分かった。耐摩耗材料においては、金属間化合物や炭化物などの硬質相の量、サイズ、分布が耐摩耗性に影響する場合がある。試作したCo基耐熱合金においても、種々の金属間化合物や炭化物が生成するように合金設計していたことから、ショルダ摩耗率と硬質相サイズの関係性を調べた結果、図2に示すように、硬質相サイズが2~5 μm のときにショルダ摩耗率は最小となり、また硬質相の

面積分率が高いほどショルダ摩耗率が低下することが示された。これは硬質相サイズが2~5 μm の場合、FSW過程における鉄鋼とCo基耐熱合金の γ 母相との接触面積が低くなるためと推察されたが、更なる検討が必要である。以上の結果より、より長寿命なCo基耐熱合金ツールを作製するためには、 γ' 相が高温まで安定的に存在し(すなわち γ' 相の固相線温度が高く)、2~5 μm 程度の硬質相が多く存在するような合金設計が有効であることが示唆された。

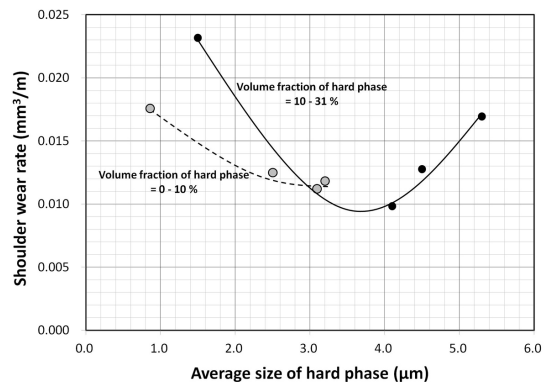


図2 ツール摩耗に及ぼす硬質相サイズの影響(ツール温度は γ' 相の固相線温度以下の場合)

(7) 長寿命ツールの試作と評価：以上の結果を踏まえ、 γ' 相の固相線温度が高く、2~5 μm 程度の硬質相の面積分率が異なるCo基耐熱合金を別途合金設計、試作した。その後、接合ツールへ加工し、FSW試験に伴うツール摩耗をツール温度が γ' 相の固相線温度以下であるFSW条件にて調べた。その結果、硬質相の面積分率を9から36%へ増加させることにより、ショルダ摩耗率を2/3へ減少させることに成功した。すなわち、Co基耐熱合金ツールの長寿命化には、 γ' 相の固相線温度が高く、2~5 μm 程度の硬質相を多く分散させることが極めて有効であり、更なる長寿命化に向けた有効な指針となることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計5件)

Y.S. Sato, M. Miyake, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida, S. Imano, I. Sugimoto, S.H.C. Park, S. Hirano: Tool material factors for suppression of wear in Co-based alloy tool during friction stir welding of 0.45C steel, *Proceedings of 10th International Friction Stir Welding Symposium*, Beijing, China, (2014), CD-R. (査読あり)

I. Sugimoto, A. Sato, S.H.C. Park, S. Hirano, S. Imano, Y.S. Sato, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida: Friction-stir-welding of thick carbon steels using Co-based alloy tool, *Friction Stir*

Welding and Processing VII, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, (2013), 101-106. (査読あり)

M. Miyake, Y.S. Sato, H. Kokawa, Y. Takaku, T. Omori, K. Ishida, S. Imano, S.H.C. Park, S. Hirano: Material properties governing wear of Co-based alloy tool during friction stir welding of steels, *Proceedings of 9th International Friction Stir Welding Symposium*, Huntsville, Alabama, USA, (2012), CD-R. (査読あり)

S.H.C. Park, S. Hirano, S. Imano, Y.S. Sato, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida: Friction-stir welding of high-softening-temperature materials using cobalt-based alloy tool, *Materials Science Forum*, **706-709** (2012), 996-1001. (査読なし)

S.H.C. Park, Y. Nagahama, S. Hirano, S. Imano, Y.S. Sato, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida: Friction Stir Welding of Titanium Alloy using a Cobalt-based Alloy Tool, *Proceedings of the 12th World Conference on Titanium*, (2011), 1616-1620. (査読なし)

[学会発表](計7件)

Y.S. Sato, M. Miyake, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida, S. Imano, I. Sugimoto, S.H.C. Park, S. Hirano: Tool material factors for suppression of wear in Co-based alloy tool during friction stir welding of 0.45C steel, 10th International Friction Stir Welding Symposium (中国・北京), 発表日:平成26年5月20日

佐藤裕, 三宅将弘, 粉川博之, 大森俊洋, 石田清仁, 今野晋也, 朴勝煥, 平野聡: 鋼の摩擦攪拌接合過程におけるCo基合金ツールの摩耗抑制因子, 平成26年度溶接学会春季全国大会(東京), 発表日:平成26年4月23日

三宅将弘, 佐藤裕, 粉川博之, 高久佳和, 大森俊洋, 石田清仁, 今野晋也, 朴勝煥, 平野聡: 鉄鋼の摩擦攪拌接合過程におけるCo基合金接合ツールの摩耗機構の検討, 平成24年度溶接学会秋季全国大会(奈良), 発表日:平成24年9月26日

M. Miyake, Y.S. Sato, H. Kokawa, Y. Takaku, T. Omori, K. Ishida, S. Imano, S.H.C. Park, S. Hirano: Material properties governing wear of Co-based alloy tool during friction stir welding of steels, 9th International Friction Stir Welding Symposium(米国・ハンツビル), 発表日:平成24年5月15日

三宅将弘, 佐藤裕, 粉川博之, 高久佳和, 大森俊洋, 石田清仁, 今野晋也, 朴勝煥, 平野聡: 鉄鋼の摩擦攪拌接合過程におけるCo基合金接合ツールの摩耗に及ぼすツール材料特性の影響, 平成24年度溶接学会春季全国大会(大阪), 発表日:平成24年4月12日

S.H.C. Park, S. Hirano, S. Imano, Y.S. Sato, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida: Friction-stir welding of high-softening-temperature materials using cobalt-based alloy tool, THERMEC'2011 (International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (カナダ・ケベックシティ)), 発表日:平成23年8月1日~5日

S.H.C. Park, Y. Nagahama, S. Hirano, S. Imano, Y.S. Sato, H. Kokawa, T. Omori, K. Ishida: Friction Stir Welding of Titanium Alloy using a Cobalt-based Alloy Tool, The 12th World Conference on Titanium (中国・北京), 発表日:平成23年6月20日~23日

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/labs/mate01.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 裕 (SATO, Yutaka)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00292243

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

大森 俊洋 (OMORI, Toshihiro)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60451530

石田 清仁 (ISHIDA, Kiyohito)
東北大学・大学院工学研究科・教育研究支援者
研究者番号: 20151368

粉川 博之 (KOKAWA, Hiroyuki)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10133050