

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14137

研究課題名（和文）摩擦攪拌接合の入熱：実測と基礎現象へのアプローチ

研究課題名（英文）Heat input during friction stir welding: Experimental measurement and approach to fundamental phenomena

研究代表者

佐藤 裕 (SATO, Yutaka)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00292243

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：摩擦攪拌接合（FSW）における「被接合材への入熱」をカロリメトリー法により実測し、接合因子から構成された実験式を得るとともに、入熱と接合品質との関連性について系統的に調べた。被接合材への入熱は熱伝導率が高いAl合金において高くなり、入熱への寄与度が最大となる接合因子は接合速度であった。また、ショルダ径に加え、プローブ形状の入熱への寄与度も高いことが示された。攪拌部の結晶粒径は、入熱と回転速度の積との間に良好な相関性を示し、また6063Al合金継手の継手強度や破断位置は入熱から予測可能であることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：Heat input into the workpiece during friction stir welding was experimentally measured by calorimetry, and then an empirical equation consisting of input variables to calculate the heat input was established. Moreover, effect of heat input on weld quality was systematically examined. The measured heat input was higher in Al alloys with the larger thermal conductivity. The input variable exhibiting the largest contribution to heat input was travel speed among the variables used in this study. Besides the shoulder diameter, the probe dimension highly affected the heat input. Grain size of the stir zone was well correlated with the normalized heat input, which was product of heat input and rotational speed, and tensile strength and fracture location of 6063 Al weld was associated with the heat input.

研究分野：工学

キーワード：摩擦攪拌接合 入熱 カロリメトリー法

1. 研究開始当初の背景

摩擦攪拌接合 (FSW) は、非消耗ツールによる固相攪拌現象を用いた固相接合技術である。これまで、アルミニウム合金を用いたロケット、航空機、鉄道車両、自動車などの輸送機器の製造技術として多用されているが、基礎現象の理解がほとんど進んでいない。特に「被接合材への入熱」は接合品質を左右する重要な因子であり、アーク溶接では定式化され、品質管理のための指標として広く使われているが、FSW では全く確立されておらず、信頼できる指標がない。これまで FSW を物理現象として捉え、種々の理論計算式が提案されているが、いずれの計算式も多くの仮定を含むため、入熱計算値と接合品質との間により相関性が得られていない。

2. 研究の目的

本研究では、FSW における「被接合材への入熱」をカロリメトリー法により実測し、接合因子 (接合条件、被接合材など) から構成される実験式を得るとともに、入熱と接合品質 (攪拌部のミクロ組織や継手の諸特性) との関連性を系統的に明らかにすることを目的とした。また、得られた結果から、FSW 過程での基礎現象、入熱や接合品質に及ぼす個々の接合因子の寄与度など、FSW 技術にとって重要な数多くの基礎知見の取得を試みた。

3. 研究の方法

(1) 被接合材への入熱の測定方法の妥当性検討：本研究では、図1で示した測定システムを用いて「被接合材への入熱」の実測を試みた。

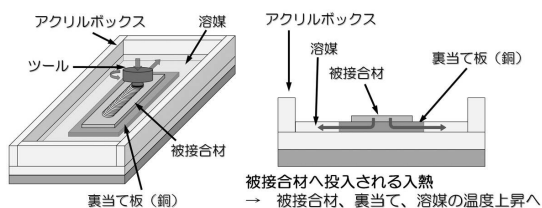


図1 本研究で用いた入熱実測のための測定システムの模式図

この測定システムの構成は、熱伝導率の低いアクリルボックスの中に銅製裏当て材を配置して、その上に被接合材をセットするという単純なものとした。アクリルボックス内に冷媒を入れてから FSW 試験を行った。冷媒は水であり、水は被接合材へ接触しないように、裏当て材の高さまで入れた。この測定システムにより「被接合材への入熱」を実測するには、システムを構成する被接合材、裏当て材、溶媒の温度が全て FSW 後に平衡値に達していなければならない。全ての温度が平衡値に達していたとすれば、それぞれの熱容量と温度上昇値を用いて、次の式により「被接合材への入熱」を計算可能である。

$$HI = \{(C_{\text{solvent}} + C_{\text{bp}} + C_{\text{workpiece}}) \times \Delta T\} / L$$

ここで、HI は被接合材への入熱 (J/mm)、 C_{solvent} は溶媒の熱容量 (J/K)、 C_{bp} は裏当て材の熱容量 (J/K)、 $C_{\text{workpiece}}$ は被接合材の熱容量 (J/K)、 ΔT は温度上昇 (K)、 L は接合距離 (mm) である。そこで、接合過程での被接合材、裏当て材、溶媒の温度変化を複数箇所熱電対を用いて計測し、上式が利用可能であるか検証した。また、入熱が定式化されたガスタングステンアーク溶接 (GTAW) 時の入熱を本測定システムにて実測し、既存の計算式で得られた入熱値と比較した。

(2) FSW 過程での被接合材への入熱等の実測：本研究では、1100、5083、6063Al 合金の FSW 過程での入熱を種々の接合条件下で実測した。これら Al 合金の板厚は 4mm を基本とし、接合ツールのプローブ長の影響を調べるにあたっては、板厚 6mm のものも用いた。変化させた接合条件はツール回転速度と接合速度であり、回転速度は 1000 ~ 3000rpm、接合速度は 200 ~ 600mm/min の範囲内で変化させた。接合ツールはショルダ径 15mm、プローブ径 5mm、プローブ長 3.8mm のねじ付きのものを基準とし、ショルダ径を 15 ~ 20mm、プローブ径を 5 ~ 8mm、プローブ長を 3.8 ~ 5.8mm の間で変化させた。FSW 時には、測定システムにある冷媒の温度を熱電対により計測し、FSW に伴う温度変化から入熱を求めた。得られた入熱データと接合因子との関係に基づいて、接合因子により構成された「被接合材への入熱」の実験式を多重回帰分析により求め、入熱に対する個々の接合因子の影響について検討した。また、FSW 時には、FSW 過程での主軸回転モータの消費エネルギー (トルク) もリアルタイムで実測し、総エネルギーに対する「被接合材への入熱」の割合について検討した。

(3) 接合品質 (攪拌部のミクロ組織・継手の諸特性) の評価：種々の接合条件で得られた FSW 継手のミクロ組織と継手特性を評価した。1100 と 5083Al 合金は固溶強化型合金であるため、攪拌部のミクロ組織、具体的には結晶粒径が継手特性に対して大きく影響する。そこで、これら合金の FSW 継手では、攪拌部の結晶粒径を EBSD 法により定量化して、結晶粒径と入熱値との相関性について検討した。一方、6063Al 合金は析出強化型合金であるため、その継手特性は攪拌部の結晶粒径にほとんど依存せず、熱影響部における強化析出物の固溶・粗大化に支配される。強化析出物の固溶・粗大化の結果、硬さが低下し、最も硬さが低い領域で引張破断が生じるとともに、その部分の硬さが継手引張特性を支配する。そこで、6063Al 合金においては、硬さ分布における硬さ低下領域の幅、最小硬さ値、継手引張強度に及ぼす入熱の影響につい

で検討した。

4. 研究成果

(1) 被接合材への入熱の測定方法の妥当性検討：上記した入熱計算式を用いるためには、測定システムを構成する被接合材、裏当て材、冷媒の温度が全て FSW 後に平衡値に達する必要がある。そこで、5083Al 合金を FSW する過程での温度変化を種々の位置で測定した(図2の右上の位置)。FSW 時に冷媒(Point 3)、水/裏当て材の界面(Point 8)、被接合材/裏当て材の界面(Point 12)で実測された温度変化を図2に示す。被接合材/裏当て材界面と冷媒/裏当て材界面では接合ツールが通過するに伴い、温度上昇した後、低下した。一方、冷媒(水)の温度は徐々に増加する傾向を示した。FSW 開始から約 200s 経過後、全ての温度は平衡値に収束したことから、温度上昇と上記計算式により入熱を計算可能であることが検証された。

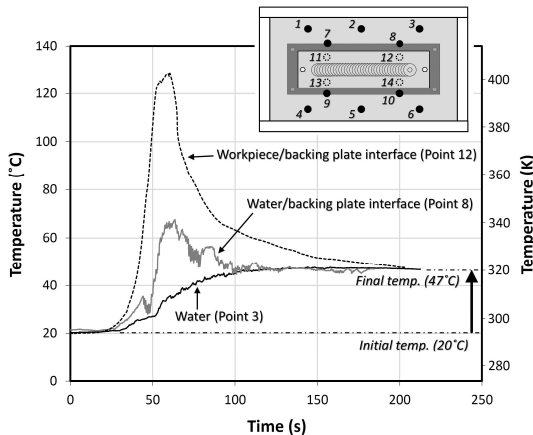


図2 5083Al 合金の FSW 過程で測定した温度変化

次に本測定システムを用いて、5083Al 合金の GTAW 時の入熱を、種々の接合速度で実測した。GTAW の溶接電流、アーク電圧、接合速度から計算された入熱値(計算入熱値)と測定システムで実測した入熱値(実測入熱値)の関係を図3に示す。

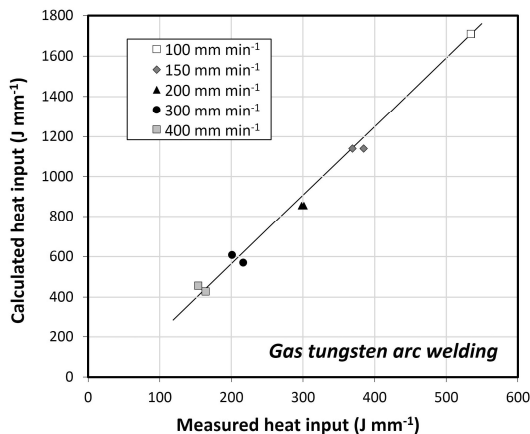


図3 5083Al 合金の GTAW 過程における計算入熱値と実測入熱値の関係

実測入熱値は計算入熱値の 1/3 程度になっているが、両者は非常に高い相関性を示すことが明らかとなった。以上の結果より、図1に示した測定システムと上記した入熱計算式を用いて、FSW 過程での入熱を実測可能であることが示された。

(2) FSW 過程での被接合材への入熱等の実測：3種類の Al 合金に対して種々の接合条件で FSW を行った結果、「被接合材への入熱」はツール回転速度が高いほど、接合速度が遅いほど高くなる傾向を示した。また、接合ツールのショルダ径、プローブ径、プローブ長の増加は「被接合材への入熱」を増加させた。さらに、1100と6063Al 合金の FSW 過程では、同一条件下で 5083Al 合金よりも高い入熱値が実測された。入熱に及ぼす合金種の影響については、熱伝導率の違いに起因しているものと推察された(1100Al: 222W/mK、6063Al: 218W/mK、5083Al: 117W/mK)。FSW 時の接合ツール周りの被接合材は、摩擦熱と加工熱で発熱する。接合時の導入ひずみ量に違いがある可能性は否定できないが、合金間の比熱の差はほとんどないため、発熱量にも大差はないと推察される。熱伝導率が高い場合、ツール周りの熱は急速に母材側へ熱伝導するため、ツール周りの温度を一定に保とうと更なる発熱が生じている可能性がある。その結果、熱伝導率が高い1100と6063Al 合金で高い「被接合材への入熱」が測定されたものと考えられる。得られた実測入熱値と接合因子の相関性を多重回帰分析により求め、以下の実験式を得た。ここで、合金種の違いは、熱伝導率で表現した。

$$HI = 7.2 V^{-0.80} N^{0.10} D^{0.55} d^{0.45} h^{0.30} \lambda^{0.40}$$

ここで HI は被接合材への入熱(J/mm)、V は接合速度(mm/s)、N は回転速度(rad/s)、D はショルダ径(mm)、d はプローブ径(mm)、h はプローブ長(mm)、 λ は熱伝導率(W/mK)である。この式で得られる入熱と実測入熱式の関係を図4に示す。両者は非常に高い直線関係を示した。

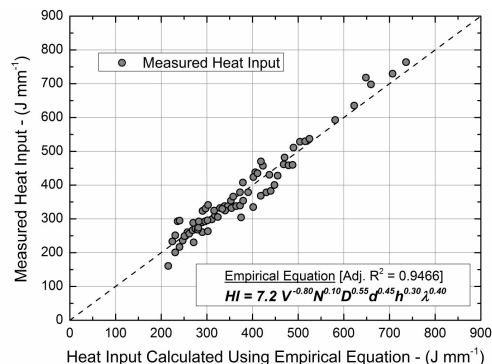


図4 実験式から得られた入熱値と実測入熱値の関係

得られた入熱実験式は物理現象を反映し

ていないが、入熱に対する個々の接合因子の寄与度を明確に示している。入熱実験式から、入熱に最も影響する接合因子は接合速度であり、回転速度の影響は非常に小さいことが分かった。また、入熱に対する接合ツール形状の影響に関しても、ショルダ径に加えて、プローブ径やプローブ長なども入熱に大きく影響していることが明らかとなった。

FSW 時のモータ出力から接合時に消費されたエネルギー（接合エネルギー）を求め、実測入熱値と比較した。5083Al 合金 FSW 時に得られた結果を図 5 に示す。実測入熱値の上の数値(%)は接合エネルギーに対する入熱の割り合いを示している。接合エネルギーのうち、20～45%が「被接合材への入熱」に変換されており、その割合は入熱が高い条件ほど減少する傾向が示された。

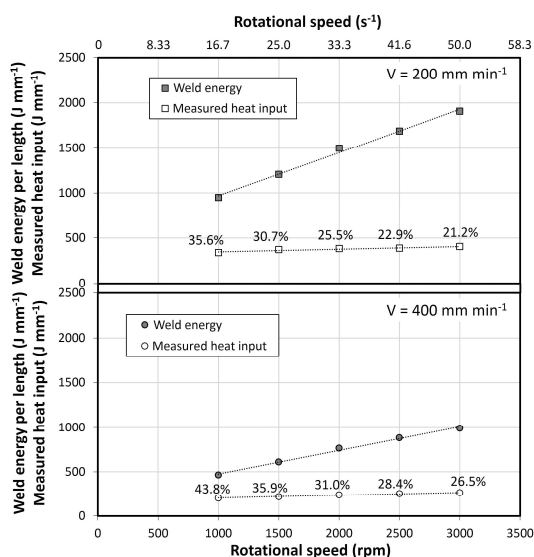


図 5 接合時の消費されたエネルギー（Weld energy）と実測入熱値に及ぼす接合速度の影響

(3) 接合品質（攪拌部のミクロ組織・継手の諸特性）の評価：1100 および 5083Al 合金攪拌部の結晶粒径と入熱の関係調べた結果、入熱の増加とともに結晶粒径は増加する傾向を示すものの両者には大きなばらつきが見られた。一般に結晶粒径は接合時の最高到達温度が高いほど大きくなり、最高到達温度は回転速度とともに増加することが知られている。一方、被接合材が最高到達温度付近に加熱されている時間は相対的に短いため、入熱に対する最高到達温度の影響は非常に小さい。これが入熱に対する回転速度の寄与度が小さい理由と考えられる。そこで、攪拌部の結晶粒径に対しては、入熱に最高到達温度の寄与を掛け合わせた“正規化入熱 = 入熱 × 回転速度”を用いて整理した結果、両者は直線関係ではないものの非常によく相関性を示した。

6063Al 合金継手においては、攪拌部を含む領域で硬さが低下し、硬さ低下領域の端部で硬さは最小となった(図 6)。硬さ低下領域は

入熱量の増加とともに拡大し、最小硬さの値も低下した。図 7 に最小硬さの位置（接合中心からの距離）と実測入熱値との関係を示すが、両者はよい相関を示した。6063Al 合金においては、微細な針状析出物が機械的特性を支配しており、FSW 過程での温度上昇に伴って針状析出物が固溶する。針状析出物が固溶した領域では硬さが低下し、この領域は熱影響の増加とともに拡大することが容易に想像できる。図 7 は針状析出物が固溶した領域の幅は入熱により予測できることを示している。また、最小硬さ値も入熱値とよい相関性を示した。さらに、継手引張試験における破断は最小硬さの領域で生じ、継手の引張強さも入熱値とよい相関を示したことから、接合条件が決まると、入熱実験式より入熱値が計算でき、入熱値より継手引張試験における破断位置（最小硬さの位置）や引張強さを求められることが示された。

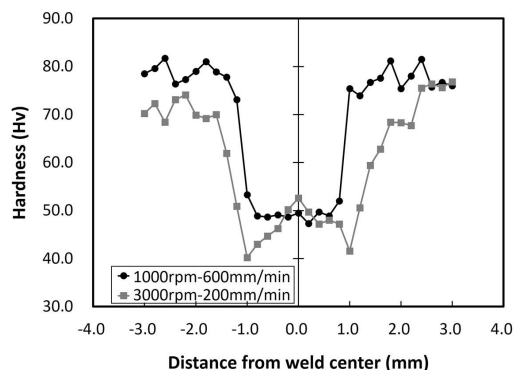


図 6 6063Al 合金 FSW 継手の硬さ分布

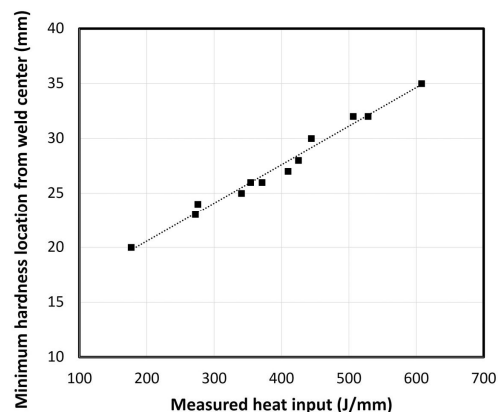


図 7 実測入熱値と最小硬さ位置（接合中心からの距離）の関係

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 2 件)

D. Yi, T. Onuma, S. Mironov, Y.S. Sato, H. Kokawa, Evaluation of heat input during friction stir welding of aluminium alloys, Science and Technology of Welding and Joining, 査読有、22 巻、2017 年、41-46

DOI: 10.1080/13621718.2016.1183079

DOI: 10.1080/13621718.2015.1112469

Y.S. Sato, T. Onuma, K. Ikeda, H. Kokawa,
Experimental verification of heat input during
friction stir welding of Al alloy 5083、Science
and Technology of Welding and Joining、査読有、
21 巻、2016 年、325-330

DOI: 10.1080/13621718.2015.1112469

〔学会発表〕(計 1 件)

佐藤裕, 古谷拓希, 大沼峻輝, 池田和広,
粉川博之、5083 アルミニウム合金の摩擦攪拌
接合過程における入熱の実験的測定、平成 28
年度溶接学会春季全国大会、2016 年 4 月 13
日、アジア太平洋トレードセンター(大阪市)

〔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/~setsugo/lab.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

藤井 啓道 (FUJII, Hiromichi)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70560225

(4) 研究協力者

なし