摩擦攪拌接合の流動現象の動的観察

東山 実樹*・篠田 剛**・竹上 弘彰***

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 56, No. 10 (2006), pp. 533-537

Visualization of material flow phenomenon during friction stir welding

Motoki HIGASHIYAMA*, Takeshi SHINODA** and Hiroaki TAKEGAMI***

A lot of papers have been appeared the clarification of material flow in friction stir welding. When aluminum alloy was used, metal flow during processing is imaged by metallurgical observation after friction stir welding process. It succeeded in taking a material flow phenomenon movie during friction stir with polymer plastics in this paper. This direct observation is revealed that two whirlpools occurred while friction stir resulting influence of pin and shoulder rotation was generated frictional heat. According to the changing of tool type, location of weld imperfection was transferred into behind the tool. In the use of left screw pin, location is move over revolution movement the end of the pin during pre-heating time.

(Received April 31, 2006 Accepted July 25, 2006)

Keywords: friction stir welding, material flow, polyvinyl chloride

1. 緒 言

近年、環境保護意識が強くなり、輸送機器メーカーでは省エネルギー化への動きが本格化している。鉄道車両メーカーでは新幹線により軽量化の時代の流れが顕著に見られ、構体にアルミニウム合金を使用した700系新幹線では0系に比べて3割程度の軽量化が実現し、それに伴って最高速度も向上した¹⁾²⁾。このように、アルミニウム合金を中心とした軽金属材料が積極的に利用されるようになった背景として、1991年に発明された摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding/FSW) が、それら材料の接合を容易にさせたことが挙げられる。それまでアルミニウム合金の溶接は主として溶融溶接が利用されてきたが、熱膨張係数が大きいことから溶接変形が大きく、また表面の酸化膜が高融点であることから前処理が必要である等、アルミニウム合金の溶接には多くの問題が生じていた³⁾⁴⁾。しかし、摩擦攪拌接合は入熱量が小さく、さらに継手効率や疲労特性が高いことから、各メーカーでは発明以後に順次導入・実用化されてきている。この摩擦攪拌接合は発明されてわずか15年で最先端技術を支える接合に利用されており、各輸送機器メーカーのニーズを大いに満たしていることは間違いない。しかし、応用技術が先行し過ぎていたために基礎研究があまり行われていないのが現状である。

摩擦攪拌接合の基礎研究は、トルクと接合荷重、入熱量の算出、温度分布、熱影響部の組織観察、流動現象解明の5つに大別できるが、流動現象について述べられた論文は、各種パラメータに大きく依存しているため、その他の基礎研究論

文に比べて報告が少ない。また、それら論文はアルミニウム合金にトレーサ等を埋込み、摩擦攪拌接合を行い、接合後に断面を観察することにより流動現象を観察している⁵⁾。しかし、この方法では摩擦攪拌後の流動状態を観察することしかできない。本研究ではアルミニウム合金を使用するのではなく、透明な高分子材料を用いて摩擦攪拌中の流動現象を動的に観察することにした。つまり、これまでの間接的な観察ではなく、直接的観察を行うことで流動現象解明を試みた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

本研究では日東機械株式会社製の摩擦圧接機を使用した。この装置は11kWのACサーボモータにより推力980~98060Nを与えることができ、37kWのACサーボモータで主軸回転数100~4000rpmを与えることができる。また、接合に必要なスライドテーブル式平行移動台はモータ制御のものをを用いた。移動台は加工中の荷重に十分耐えられるものである。

2.2 供試材

ツールには直径20mm、長さ135mmのSUS316のステンレス鋼を使用した。ピン長は5.0mmとしM5のネジで加工した。また、ショルダ部にはばりの排出を抑制するための加工を施している。透明高分子材料には、予備実験より最も良好な流動を示したポリ塩化ビニル (Polyvinyl Chloride/PVC) を用いた。PVCの主な物性値は、軟化点: 349K、透過率: 85%、熱伝導率: 0.17 W/mK、伸び: 80%、引張強さ: 75MPaであり、FSWが適用される代表的なアルミニウム合

* 名古屋大学大学院生 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)。Graduate Student, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603).

** 名古屋大学大学院工学研究科 (名古屋市) [現在: 光生アルミニウム工業(株) (豊田市)]。Graduate school of Engineering, Nagoya University (Nagoya-shi, Aichi) (KOSEI ALUMINUM CO., LTD. (Toyota-shi, Aichi)).

*** 名古屋大学大学院工学研究科 [現在: 名古屋工業大学 (名古屋市)]。Graduate school of Engineering, Nagoya University [Present: Nagoya Institute of Technology (Nagoya-shi, Aichi)].

金である6061-T6材では融点：925K, 熱伝導率：0.17W/mK, 伸び：12%, 引張強さ：310MPaである。このように、両者の物性値は大きく異なり、金属におけるFSW条件をそのまま当てはめても流動現象の観察は行えない。しかしながら、FSWにおいては塑性流動が接合に重要であり、PVCにおいても欠陥のない接合部が得られるならば、基本的な流動現象は金属におけるFSWと同様であると考えられる。本研究では、予備実験によりPVCが良好な流動性を示す条件が得られており、FSW条件は限定されるものの、流動現象の解明にPVCを用いることが可能であると考えた。PVCは、30×100×厚さ38mmのブロックを用いた。FSWは通常板材の突合せ接合に用いられるが、本研究では透明材料を用いた流動現象の直接観察を目的としたため、接合部を設けず、良好な流動を得られやすい単一ブロックへのFSWを行い、流動現象を観察した。

2.3 拘束条件・観察方法

高分子材料の拘束条件ならびに観察方法をFig. 1に示す。PVCブロックに穴を開け、L字型金具とボルトを用いて横移動テーブルに固定した。また、撮影にはDVDビデオカメラを使用し、摩擦攪拌中の状況をRetreating side (RS) からピン周辺を中心に撮影した。高分子材料を使用することにより、PVCのRS側面からピン周辺までの可視化は可能となったが、透明材料であるためにピン周りの材料がどのように流動しているかが観察できない。したがって、観察可能となるように本研究ではPVCを加熱して脱塩酸分解することによって得られた黒色分解生成物を実験前にツールへ付着させておき、ツールの攪拌状況を明確化させた。

2.4 実験条件

実験条件をTable 1に示す。加工条件は、主軸回転数を750rpm, 加工速度を1.5mm/s, 前進角を3°とした。ツールのショルダ部分がPVC表面に接してから2s間を予熱時間とし、2s経過後にPVCを固定したテーブルの移動を開始した。また、ツール形状による変化を調べるため、ピンに右ねじと左ねじの加工を施した2種類のツールを使用した。

2.5 温度測定

PVCを用いた摩擦攪拌接合において、加工中のPVCの状態を調査するため、温度測定を行った。測定にはφ0.3mmのアルメル・クロメル熱電対を用いた。測定位置は、ツール中心からAdvancing side (AS), RS方向へそれぞれ5.0mm, PVC表面から深さ方向へ1.0mmの位置とした。加工条件については前項と同じである。

3. 実験結果および考察

3.1 右ねじにおける流動観察

本研究において、撮影した動画を見ながら説明を行うことが摩擦攪拌接合の流動現象の理解を深める最善の策である。しかし、本論文は紙面のみでの発表であるため、動画の情報はない。

右ねじツールを使用して実験を行った結果をFig. 2に示す。これは撮影した動画を画像に変換したものである。ピン先端がPVCと接するときを $t=0[s]$ とし、各々の画像の右下に経過時間を記し、その時間までにツールが回転した回数を右上に記している。PVCの透明度が高く、これらの静止画では流動を観察することが困難であるため、参考として特定の

Fig. 1 Observation system for visualization of FSW using PVC.

Table 1 Friction stir welding conditions

Rotational speed, N [rpm]	750
Weld speed, f [mm/s]	1.5
Tilt angle, θ [deg.]	3.0

1つのトレーサの各時間での位置を矢印で示している。ピン挿入から3.32秒後にはショルダがPVCと接し、2秒間の予熱が始まる。静止画では確認が困難であるが、動画による観察において予熱段階(3.32~5.34秒)からピン周りでの塑性流動が確認できている。このとき主軸回転による摩擦熱がピン・ショルダ周辺で発生し、ピン周辺とショルダ下部のPVCが軟化する。軟化したPVCは、右ねじ効果によりピン周辺の材料は下向きの力を受ける。したがって予熱時にピン先端付近で欠陥は発生しない。また、加工精度の悪いツールを用いた場合(ピンがツールの中心に付いていない等)であっても、欠陥は埋められる傾向にある。ピンがPVCと接してから6.24秒後には黒色トレーサが観察された。これらのトレーサはツール前方よりRSを迂回して後方へ回された材料であり、左回転するピンの影響を受けてピン後方では右回りの回転運動をする。本実験の場合、前進角を3°設けているため、回転渦の軸が3°傾いている(Fig. 3)。よって若干の上下運動はあるものの、トレーサは1回転すると元の位置に戻ってくるため、この渦による上下方向の大きな攪拌は期待できない。また、この渦の回転はピンの回転の影響を受けて発生しているため、回転半径はピンよりも小さく、速度の遅い渦である。

ピンが挿入されてから10.47秒後にはショルダの影響を受けるようになる。ショルダでは、内周より外周の方が周速度が速くなるため、中心部より外周部の方がPVCに与える影響が大きくなる。ピン後方で回転している渦は、水平方向に回転運動しているため、ショルダの影響は受けていないが、ツールが前進するにつれショルダの影響を受けるため、トレーサは縦回転の流動をし始める。よって10.47~10.68秒で見られるように、接合方向に平行な軸を持つ渦により、攪拌されるようになる。さらに、本実験では前進角を3°設けることで、前進角0°の場合よりもさらに大きな攪拌力を与えている。これはPVCの中に見られるトレーサの流速によっても判断できる。ピン後方の渦は、半径1.9mm, 流速9.61mm/sであるのに対し、ショルダ下部の渦は、半径5.0mm, 流速20.5mm/sである。よってショルダ外周部は、内周部に

Fig. 2 Material flow in PVC during FSW (Right hand screw). t : time, R : number of revolutions

Fig. 3 Schematic illustration of material flow in PVC (Right hand screw pin tool).

比べ攪拌力が強いということがわかる。また、ショルダ外周部は摩擦熱が発生しやすいため、材料が軟化しやすく、流動が積極的に行われ、流速が速くなっていると考えられる。

加工後半にはピン先端で欠陥が発生し始めている。これはショルダに比べてピン先端では摩擦熱が発生しにくいいため、ショルダよりも早く欠陥が発生しているものと考えられる。

3.2 左ねじにおける流動観察

左ねじツールを用いて実験を行った結果を Fig. 4 に示す。右ねじ同様、ピンがPVCと接したときを $t=0[s]$ とする。3.15秒後にはショルダがPVCと接し、5.15秒後には加工が始まる。5.15秒後の写真を見ると、ピン先端には白い空洞が見られる。これはPVCとピンの間に発生した空洞である。つまり、ピン先端に欠陥が発生している。これはショルダがPVCと接してから加工が始まるまでの間（3.15～5.15秒）にピン周辺のPVCは左ねじ効果によって上向きの力を受けるため、ピン先端の材料が不足して欠陥が発生したと考えられる。

Fig. 4 Material flow in PVC during FSW (Left hand screw). t : time, R : number of revolutions

Fig. 5 Schematic illustration of material flow in PVC (Left hand screw pin tool).

加工が始まるとピン前方よりRSを通り後方へ回された材料は、欠陥を充填するように下方へ移動する (Fig. 5)。よって、加工が始まって数秒間は右ねじの場合と現象は異なり、下方の材料流動が発生する。しかしこの欠陥はすぐ充填され、7.69秒後にはピン後の渦が水平方向の円運動をするようになる。この流動は右ねじの場合と同じ現象である。さらに加工が進み、ショルダの影響を受けるようになると、接合方向に平行な軸を持つ渦によって攪拌される。この渦は、右ねじ・左ねじ同じ主軸回転におけるショルダ下の渦である

Fig. 6 Relationship between process time and temperature of FSW.

ため、流動速度・回転半径は同じである。したがって、ショルダ下の渦ではピンの形状による影響はないものと考えられる。

左ねじピンを使用した場合、右ねじに比べ流動は積極的に行われる。しかし、予熱時に発生した欠陥は加工条件によって必ずしも充填することができないため、接合の信頼性に関してよい結果を得られないと考えられる。

3.3 PVC における温度測定

PVC 試験片を用いて温度測定を行った結果を Fig. 6 に示す。AS では最高温度が 125°C、RS は 105°C である。RS の PVC が 20°C 低い理由は、ツールが前進することによって常温の

PVC がまず RS へ回り、その後、AS へ移動するためである。つまり、AS はツールの入熱・摩擦熱によって暖められた PVC が、RS から回ってくるためである。

また PVC は、65~85℃で軟化し、120~150℃で可塑化する。温度測定で得られた AS の 125℃と RS の 105℃はともに軟化域を超えているため、ショルダ付近の PVC は十分に軟化している。また、PVC は 190℃を超えると塩酸を放出して分解するため、本実験で測定した 125℃では PVC の劣化は起こっていない。このように、軟化する温度は異なるが、PVC においても常温で固体の状態から温度上昇により軟化し、流動可能な状態になる。攪拌領域が適当な流動を示す状態になるよう温度上昇させることにより、金属と同等の流動現象となると考えられる。熱伝導率等は金属と大きく異なるが、ツールおよび FSW 条件を適切に設定することにより、ツールによる攪拌領域での軟化の状態が金属と同様の流動を示す状態になっていると考えられる。

4. 結 言

ポリ塩化ビニルの透明高分子材料を用いて摩擦攪拌接合の可視化を行った結果、以下の結論を得た。ただし、動画による情報を掲載できないので、著者の意を十分示せないことを

お詫びする。

(1) 摩擦攪拌中には2つの渦が発生していることが観察された。1つはピン後に発生したツールに平行な軸を持つ渦である。他の1つは後方ショルダ下に発生した接合方向に平行な軸を持つ渦である。

(2) 右ねじピンを使用した場合、ピン後に発生した渦は 9.61 mm/s の速度で右回転し、後方ショルダ下に発生した渦は 20.5 mm/s の速度で右回転していることが観察された。

(3) 左ねじピンを使用した場合、予熱時にピン先端で欠陥が発生するが、加工が始まるとその欠陥は充填される。また、その後の流動は右ねじと同様である。

(4) 温度測定の結果、PVC はショルダからの入熱、主軸回転による摩擦熱により十分に軟化しており、また、それら熱による劣化はなく、加工前後における物質の変化はない。

参 考 文 献

- 1) 末松 浩：溶接学会誌，**74** (2005)，10-14.
- 2) 古賀信次：溶接学会誌，**72** (2003)，49-52.
- 3) 時末 光編著：FSW（摩擦攪拌接合）の基礎と応用，日刊工業新聞社，(2005).
- 4) 岡村久宣：溶接学会誌，**69** (2000)，11-17.
- 5) Colligan: Welding Journal, **78** (1999)，229.