ADC12/5052 アルミニウム合金異材摩擦攪拌接合継手における
引張強さと断面硬さ分布の関係小久保 正史^{*,**}・高山 善匡^{**}・和井 伸一^{*}
金内 良夫^{*}・加藤 一^{**}・平野 聡^{***}

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 58, No. 4 (2008), pp. 146-150

Relation of tensile strength and hardness distribution in friction stir welded joints of
ADC12/5052 dissimilar aluminum alloysMasafumi KOKUBO^{***}, Yoshimasa TAKAYAMA^{**}, Shinichi KAZUI^{*}
Takao KANEUCHI^{*}, Hajime KATO^{**} and Satoshi HIRANO^{***}

ADC12 and 5052 dissimilar aluminum alloys have been connected by friction stir welding (FSW). The temperatures at the stir zone and at four points on each outside of the joint line were measured during FSW in various conditions. After FSW, the tensile test was carried out in the direction perpendicular to the joint line. Tensile strength did not depend on the traveling speed, and indicated an almost constant value by about 88% of mother material strength. However, the necking feature in the breaking part was influenced by the traveling speed. That is, the necking was caused at low traveling speeds of FSW while it was hardly caused at high traveling speeds. The two-dimensional hardness distribution in the WD section was measured for various FSW conditions. The material flow with stirring and the spatial difference of the hardness distribution appeared at various traveling speeds. The stirred region consisting of stir zone and thermomechanical affected zone and the softened part in the stir zone were wider in the 5052 side at lower traveling speed. Softening in the 5052 side was scarcely observed in high traveling speeds. Moreover, the difference of softening in this 5052 was attributed to a difference in the heat input by changing the traveling speed.

(Received October 4, 2007 Accepted January 7, 2008)

Keywords: friction stir welding, hardness distribution, aluminum alloys, dissimilar alloys, heat input

1. 緒 言

摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding : 以下 FSW) は, 1991 年に英国で開発¹⁾されて以来, 従来の溶接法にない優れた特徴を持つ革新的な固相接合技術として注目され, 鉄道車両, 航空機, 船舶, 自動車, 土木構造物を中心に, 多くの分野の製品に実用されている^{2)~4)}。これらの実用を踏まえて, 鋳造材と展伸材との FSW 異材接合に関する研究もなされている^{5)~8)}。著者らは, アルミニウム合金ダイカスト ADC12 と 5052 アルミニウム合金展伸材の FSW 継手における組織と接合強さの関係を調べ, 両合金の配置により接合部断面組織が明確に異なること等を明らかにした⁹⁾。すなわち, 前進側 (Advancing side; AS) に 5052, 後退側 (Retreating side; RS) に ADC12 を配した継手 (以下 AS/RS の順で表記する) において, 両者を入替えた配置の継手に比べて, 攪拌部の異材接合界面の凹凸が激しく, 両合金がよりよく混合されている組織を呈した。この結果は, 接合速度が異なる条件での組織の違いと類似しており, 配置の違いが接合時の温度の差を生じさせていることを示唆した。また前報¹⁰⁾では, 温度解析に

おいて, 接合速度と入熱量, 材料の温度, 攪拌に消費される仕事について検討した。配置の違いによる温度差は, FSW 時の攪拌状況に影響を与え, さらに材料組織形成に影響を与え, 結果として接合部の強さを左右すると推測される。しかしながら, 既報⁹⁾のように, 接合速度と材料配置の違いは継手の引張強さに現れていない。

そこで, 本研究では, 材料組織には明確な差を生じさせながら継手強度には明確な差を与えない FSW 条件の影響を明らかにするため, 接合中の温度を測定しながら異材の FSW を行った。また, 継手の引張試験を行い, 攪拌部断面の硬さ分布を測定した。これらの結果から, FSW の材料配置, 接合速度の違いによる攪拌の程度, 入熱の傾向に着目し, 引張強さと硬さ分布との関係を詳細に検討した。

2. 実験方法

供試材料には板厚 2.3mm のアルミニウム合金ダイカスト (ADC12) とアルミニウム合金展伸材 (5052-H34) を使用した。Table 1 に使用したアルミニウム合金の化学組成を示す。ADC12 と 5052 の熱伝導率はそれぞれ 94, 137 W・m⁻¹・K⁻¹ で

* 日立金属(株) (〒360-0843 埼玉県熊谷市三ヶ尻 6010)。Hitachi Metals, Ltd. (6010 Mikajiri, Kumagaya-shi, Saitama 360-0843)。

** 宇都宮大学工学部機械システム工学科 (宇都宮市)。Department of Mechanical Systems Engineering, Utsunomiya University (Utsunomiya-shi, Tochigi)。

*** (株)日立製作所 (日立市)。Hitachi, Ltd. (Hitachi-shi, Ibaraki)。

Table 1 Chemical compositions of specimens (mass%)

	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Sn	Cr	Al
ADC12	1.5~3.5	9.6~12.0	~0.3	~3.0	~1.3	~0.5	~0.5	~0.3	—	Bal.
5052	0.01~0.02	0.08	2.50~2.61	0.17~0.22	0.27~0.28	0.01~0.02	—	—	~0.01	Bal.

Fig. 1 Schematic illustration showing direction of friction stir welding (FSW) and positions of temperature measurement.

ある¹¹⁾。FSWは2枚の板を突合せて行った。FSWに使用したツールは、ショルダ径7mm、プローブの径と長さはそれぞれ3mm、2mmである。ツールの前進角は3度とした。回転数は2000rpmとし、接合速度は125~2000mm/min(2.08~33.3mm/s)の範囲とした。**Fig. 1**にFSW方向と温度測定位置の概略図を示す。材料表面温度は接合開始点から125mmの位置で、突合せ線から5mmごとに両側8箇所の表面を薄型K熱電対により測定した。FSW後、接合方向と垂直でFSW部が引張試験片平行部中央になるように、平行部幅6mm、平行部長さ32mmの試験片を作製し引張試験を行った。また、FSW後の断面をマイクロビッカース硬さ試験し、FSW部の硬さを測定した。

3. 結果と考察

3.1 引張試験

Fig. 2に引張強さおよび破断伸びと接合速度の関係を示す。1500, 2000mm/minの接合速度の断面観察において、微小な欠陥が見られたが、引張強さは、125~2000mm/minの接合速度範囲、ASとRSの材料の配置による変化がほとんど見られず、全条件でほぼ一定の約230MPaとなった。5052-H34の母材引張強さは260MPaであるので、継手効率は約88%であった。一方、伸びの値は、ばらつきはあるものの、接合速度の増加に伴い減少傾向が見られた。既報⁹⁾の接合速度500~1500mm/minの条件においてほぼ一定の引張強さが得られていたが、本研究でより低速度側の125, 250mm/min、さらに高速度側2000mm/minの条件でFSWを実施し、より広範囲の接合速度条件において、引張強さが一定であることが確認された。**Fig. 3**に引張試験で破断した破断部のマクロ組織を示す。5052/ADC12の配置では、125mm/min~2000mm/minの全接合速度で攪拌部ASの5052側で破断した。これに対して、ADC12/5052の配置では、125mm/min~1000mm/minの接合速度で攪拌部RSの5052側で破断し、1500, 2000mm/minの接合速度では攪拌部ASのADC12側の内部欠

Fig. 2 Relations between traveling speed and tensile strength, and elongation in dissimilar FSWed joints of 5052/ADC12 and ADC12/5052 aluminum alloys. A part of data in the traveling speed range from 500 to 1500 mm/min is quoted from a previous paper⁹⁾. **Fig. 3** Fracture part of tensile specimen after failure.

陥で破断した。引張試験では、後述の硬さ分布で最も硬さの小さい場所であったFSW攪拌部の5052側で破断した。破断部のネッキングを比較すると、低接合速度(125mm/min)の条件で幅方向に5052/ADC12の配置では15.4%, ADC12/5052の配置では18.5%絞れているのに対し、高接合速度(2000

mm/min) の条件では 5052/ADC12 の配置では 9.2%, ADC12/5052 の配置ではほとんど変形がなかった (絞り: ほぼ 0%)。低接合速度の方が明らかにくびれの程度が大きいことがわかった。ネッキングは主に 5052 側で生じていた。伸びの値に大きな差が見られなかった原因は, 接合継手の攪拌部において, より硬い ADC12 が 5052 の変形を拘束しているためと考えられた。

3.2 断面硬さ分布

次に, この引張破断時のネッキングの違いを硬さ測定により詳細に検討した。Fig. 4 にマイクロビッカース硬さ試験後の断面の光学顕微鏡写真と, 2 次元的な硬さ分布の一例 (125 mm/min) を示す。(なお, Fig. 4 および Fig. 5 中, 白点は測定不良点である。) FSW した (a) 5052/ADC12 および (b) ADC12/5052 の配置の継手である。圧痕の間隔は, 継手の幅方向 0.5mm, 厚さ方向 0.4mm である。硬さ分布図の上面は, 試料断面の上面からおおむね 0.4mm 程度離れており, FSW 部上面とは一致しない。写真では継手両側の材料の違いが, コントラストの違いとして現れた。硬さ分布では, 5052 が約 60~80HV, ADC12 が約 80~120HV の硬さを示した。硬さ分布図横軸中央付近の攪拌部において, FSW により 5052 がより外側の母材部の硬さよりも軟化していることがわかる。これは 5052 が H34 の加工硬化処理されている材料であり, FSW 攪拌部や熱影響部で入熱により加工ひずみが解放され軟化するという FSW ではしばしば観察される現象である^{12),13)}。Fig. 4 (a) 硬さ分布図の攪拌部 5052 側には, 90HV 以上の硬い領域が島状に出現していた。これは, マクロ組織から ADC12 の材料であると考えられる。著者ら⁹⁾ は, 同様な分布を EPMA による元素分析において 5052 中に ADC12 が分布しているものであることを確認しており, オニオンリングの一部であると考えられた。このような状態は内部欠陥もなく攪拌部で両側の材料がよく攪拌された状態であると言える。

Fig. 5 に 5052/ADC12 の配置の接合継手断面硬さ分布図を, 接合速度 125~2000mm/min の順に並べて示す。Fig. 6 は Fig. 5 の AS と RS の材料を入替えた ADC12/5052 の配置の接合継手断面硬さ分布図である。FSW では, RS の材料が攪拌部上部において AS 側に, また攪拌部中心から下部においては AS の材料が RS 側に流動するという現象が見られる。特に低接合速度の硬さ分布図から, その様子が見られた。この攪拌部両側材料の流動現象は接合速度の増加に伴い, 左右材料の相互の入り込み範囲が狭くなっている傾向があることがわかった。すなわち, 125mm/min の条件で約 3mm の材料の入り込みがあったのに対し, 2000mm/min の条件では約 2mm の入り込みに留まっていた。これは, 接合速度が大きくなると材料の温度が低くなり流動がしにくくなることと, 単位体積に注目したときにその体積が攪拌されている時間が短くなることが複合していると考えられる。

次に, Fig. 5 において, 5052 側の攪拌部の軟化程度を比較する。5052 は H34 材であるので, FSW により攪拌部および熱影響部が軟化した。母材部の硬さが約 75HV であるのに対して, 攪拌部では 60HV 以下まで低下した場所もあった。その軟化の程度は, 接合速度の増加に伴い, 減少する傾向が見られた。また, 軟化部分の面積も接合速度の増加に伴って減少する傾向が見られた。

上記の軟化傾向は, AS と RS の材料を入替えた配置 Fig. 6

Fig. 4 Optical macrographs and hardness distribution chart of the joints FSWed at a traveling speed of 125 mm/min. (a) 5052/ADC12 and (b) ADC12/5052.

Fig. 5 Hardness distribution chart of 5052/ADC12 FSWed joint at traveling speeds from 125 to 2000 mm/min.

Fig. 6 Hardness distribution chart of ADC12/5052 FSWed joint at traveling speeds from 125 to 2000 mm/min.

Fig. 7 Average Vickers hardness in stir zone as a function of traveling speed.

Fig. 8 Temperature at positions 5 mm away from butt line of joints as a function of traveling speed.

においても同様である。すなわち、接合速度が低速になるにしたがって、攪拌部 5052 側の軟化の程度が大きく、かつ、軟化の範囲も広がった。材料配置の違いは、攪拌の程度に現れている。詳細は後述する。**Fig. 7** は、接合中心から $\pm 3\text{mm}$ の攪拌部における 5052 の平均硬さと接合速度との関係を示す。1000 mm/min 以下の接合速度ではほぼ一定の値ともみなせるが、全速度範囲を見ると、右上がりの傾向であると言える。引張試験による材料のネッキングと接合速度の関係は、ここで述べた 5052 の軟化具合に関係していることがわかった。また、両材料の入り込みは、引張試験の際、相対的に硬い材料である ADC12 が相対的に軟らかい 5052 の変形を拘束している可能性が示唆される。前述 Fig. 3 の接合速度 125 mm/min の条件での幅方向の絞りが、5052/ADC12 の配置で 15.4%、ADC12/5052 の配置で 18.5% という数字にも現れている。この、接合速度が遅い条件で軟化の程度が大きいという傾向は、FSW 時の入熱量、材料の上昇温度によるものと考えられる。既報¹⁰⁾において 5052/ADC12 配置の攪拌部温度は接合速度 125 mm/min において約 510°C、500 mm/min において約 460°C と測定された。すなわち、単位体積あたりの入熱量

が多く、材料の温度上昇が大きい低接合速度の FSW 条件で、5052 の軟化の程度が大きくなったと考えられる。この攪拌部 5052 の軟化の傾向は、Fig. 3 引張試験片破断部のネッキングの傾向と一致し、引張強さや破断伸び値に影響した。ネッキングにより伸びた継手、すなわち、FSW によって軟化した継手は、引張試験中に加工硬化し引張強さが増加した。一方、伸びていない継手、すなわち、FSW によって軟化していない継手は、加工硬化が少ない。結果として、両者の引張強さが FSW 速度に依存せずほぼ同じ値となったといえる。しかしながら、実用の観点から両継手の特性が異なることは明らかである。

次に、Fig. 5 および Fig. 6 で示した配置の違う両者を同接合速度で比較する。Fig. 5 の 5052/ADC12 の配置 125 mm/min および 250 mm/min の断面において、AS : 5052 側の攪拌部に硬さが高い ADC12 材の現れている場所が存在したが、Fig. 6 の ADC12/5052 の配置では Fig. 5 に見られた薄片状の ADC12 は見られなかった。これは、5052/ADC12 の攪拌部に比べて、ADC12/5052 は両材料の流動が少なかったと言える。さらに、1000、1500 mm/min の条件の攪拌部を比較すると、Fig. 5 の

5052/ADC12 の配置の方が、5052 側の軟化している範囲が広い。これは、次節に述べるように、AS/RS の材料の配置によって、攪拌の程度や材料の温度が異なることを示唆しており、異種材料の FSW においては材料配置が重要になる場合があると考えられる。

3.3 攪拌部付近の温度

Fig. 8 に接合中心から 5mm 離れた位置での温度と接合速度との関係を示す。5052/ADC12 の配置では、AS と RS の 5mm 離れた位置での温度差はほとんどみられなかった。これに対して、ADC12/5052 の配置では、RS の 5052 の方が、AS の ADC12 と比べて温度が高く、約 50°C 程度高い温度になった接合条件もあった。これらの条件では RS でばりが発生し熱電対を覆っていた。このばりは攪拌部で高温に熱せられた材料であり、測定温度が上昇する方向に作用したと考えられる。接合速度による変化傾向を見ると、接合速度が遅いほど高温になっていた。これは、攪拌部 5052 の硬さ分布の接合速度依存傾向と一致する。

また、それぞれの接合速度で 5052/ADC12 の AS:5052 と、ADC12/5052 の RS:5052 の温度を比較すると、どの接合速度でもそれぞれほぼ等しい値となった。著者ら¹⁰⁾は異種材の接合は AS の材料同士を接合したときの温度に近いことを確認しており、入熱量が等しいと仮定すると、比熱の小さい 5052 の方が温度は高くなった。ADC12/5052 の RS:5052 の温度が高温のばりによって実際の材料の温度よりも若干高めに測定されたと仮定すると、5052/ADC12 の配置の方が ADC12/5052 の配置よりも 5052 の温度が高い結果となった。5052/ADC12 の配置の方が ADC12/5052 の配置よりも軟化しているという硬さ分布の傾向に一致することがわかった。

4. 結 言

アルミニウム合金ダイカストとアルミニウム合金展伸材の FSW 継手の硬さ測定を行い、温度や引張強さとの関係を検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 125mm/min から 2000mm/min の接合速度範囲において、接合継手の引張強さは FSW 速度の影響はほとんどなく、

5052 母材強度の約 88% でほぼ一定の約 230MPa であった。

(2) 125mm/min から 2000mm/min の接合速度範囲において、攪拌部 5052 の軟化の程度は、低接合速度の方が軟化していることがわかった。軟化が激しい低接合速度においては、材料の流動性がよく、高接合速度と比較してより異材の攪拌領域が広がった。

(3) 攪拌部 5052 の軟化の傾向は、引張試験片破断部のネッキングの傾向と一致し、引張強さや破断伸び値に影響した。ネッキングにより伸びた継手は引張試験中に加工硬化し引張強さが増加し、伸びていない継手は加工硬化が少ない。以上のように、FSW 条件で継手の特性が異なり、必ずしも継手を引張強さのみで評価できない。

参 考 文 献

- 1) W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needhan, M. G. Murch, P. Temple-Smith and C. J. Dawes: International Patent Application PCT/GB92/02203 and GB Patent Application 9125978.8, UK Patent Office, London, December 6, 1991.
- 2) 溶接学会：摩擦攪拌接合，産報出版，(2006)，12-31.
- 3) 時末 光：FSW の基礎と応用，日刊工業新聞社，(2005)
- 4) 摩擦圧接協会：摩擦接合技術，日刊工業新聞社，(2006)，238-246.
- 5) Z. Y. Ma, R. S. Mishra and M. W. Mahony: Scripta Mater., **51** (2004), 931-935.
- 6) W. B. Lee, Y. M. Yeon and S. B. Jung: Scripta Mater., **49** (2003), 423-428.
- 7) K. Okamoto, S. Hirano, M. Inagaki: Sheet Metal Welding Conference XI, (2004), 1-7.
- 8) 立野高寛，津村卓也，駒崎 徹，赤松勝也，中田一博：鑄造工学，**78** (2006)，389-395.
- 9) M. Kokubo, S. Kazui, T. Kaneuchi, Y. Takayama, H. Kato and S. Hirano: Materials Science Forum, Vols. 539-543 (2007), 3789-3794.
- 10) 小久保正史，高山善匡，和井伸一，金内良夫，加藤 一，平野聡：軽金属，**57** (2007)，511-517.
- 11) 軽金属学会：アルミニウムの組織と性質，(1991)，454-533.
- 12) Y. S. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto and S. Jogan: Metall. Mater. Trans. A, **30A-9** (1999), 2429-2437.
- 13) H. Liu, H. Fujii, M. Maeda and W. Tang: Scripta Mater., **52-6** (2005), 491.