

異種材料接合界面の強度評価

Strength Evaluation on Bonded Interface between Dissimilar Metals

久保田 剛 Tsuyoshi Kubota 安達修平 Shuhei Adachi

●技術本部基盤技術研究室

要旨

アルミニウム合金と鉄系焼結合金の接合界面について、接合強度を正確に評価する手法を開発した。また、その継ぎ手強度を断面の組織パラメータから推定するためのモデルを提案し、推定される継ぎ手強度と実験値とを比較することにより、モデルの妥当性を検証した。さらに、接合界面の破壊靭性値を求めるため、平面上に複数のpenny-shaped cracksが分布するモデルを考案し、計算結果をバルク材料の破壊靭性値と比較した。これらの手法を用いることにより、継ぎ手の高温での信頼性が確認でき、品質管理手法として有効であることが確認された。

1 はじめに

近年、地球環境保全や省資源といった社会的ニーズの高まりに伴い、自動車をはじめとする輸送機器の構造および動力源の軽量化、高効率化への要求はますます厳しくなってきている。中でもアルミニウム合金は、その高い比強度と良好な熱伝導特性のために多用される傾向にある。しかし、鉄鋼材料には、アルミニウム合金で代替できない種々のすぐれた特性もあり、両者の住み分けがはかられているのが現状である。さらに、一層の軽量化と高効率化を進めるためには、両材料の特性を生かし、互いに部分的な補強をする複合構造が有効であり、そのためには、鉄系合金とアルミニウム合金の接合を高い信頼性で実現する技術の確立が必要である。

鉄系材料とアルミニウムまたはアルミニウム合金の間の接合については、早くから多くの研究がなされてきており、その継ぎ手強度の評価方法に関する報告も多い^{(1)～(9)}。稻波ら⁽¹⁰⁾は、抵抗発熱を利用した新しい拡散接合法によって、鉄系焼結合金とアルミニウム焼結合金の接合を実現したと報告しているが、接合界面の強度評価法についての詳細は明らかにされていない。

本稿では、稻波らと同様の接合方法を用いて作製した部材について、その接合界面の継ぎ手強度を正確に評価できる方法を開発し、測定結果に関する考察を行った。

2 実験方法

2.1 材料

鉄系材料として、C-Cr-Ni-Co-W系鉄基焼結合金に銅溶浸処理を施したものと、また、アルミニウム合金としては、JIS AC4C材（Al-Si7-Mg系）で鋳造後、溶体化人工時効処理（以下、T6処理という）を施したもの用いた。表1に、使用したJIS AC4C材の化学成分を示す。

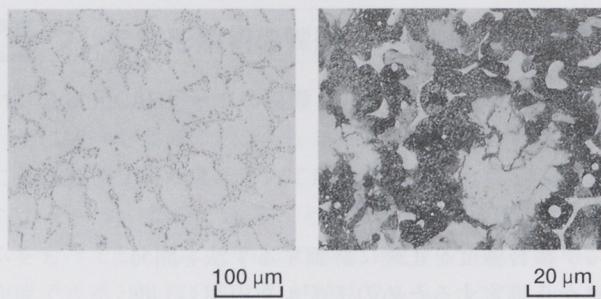
表1 アルミニウム合金焼結物の化学成分(質量%)

Si	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn	Ni	Ti	Al
7.0	0.37	0.14	0.14	0.02	0.01	0.01	0.12	bal.

両材料の接合前の状態での微細組織を図1に示す。鉄基焼結合金は、基地であるパーライト相の中にステライト系（W-Co-Fe）の硬質粒子とそれを取り巻くCoの濃化した白色相（以下、高合金相という）が島状に分散した構造をもち、焼結空孔は溶浸された銅（以下、溶浸銅相という）で満たされている。各相の面積率を表2に示す。アルミニウム合金焼結物は、平均デンドライトアーム間隔（DAS）約39 μmの初晶α相の間に、平均粒径3 μmの共晶Si粒と微細なMg2Si粒が分布した構造をもっている。

表2 鉄系焼結材中の各相の面積率

相	硬質粒子	高合金相	溶浸銅相	パーライト相
面積率 (%)	4.4	17.4	7.6	bal.



a) アルミニウム合金鋳物 b) 鉄基焼結合金
図 1 微細組織

2.2 接合方法および強度評価試験条件

アルミニウム合金鋳物と鉄系焼結材の2つの材料を、自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集に発表された「鉄系焼結材料とアルミニウム合金の結合」⁽¹⁰⁾で記述されている方法によって接合し、図2に示したような試験片を切り出して、継ぎ手強度評価に供した。継ぎ手強度評価は、試験片の両端をチャックし、長手方向に引っ張りの相対変位を与えた時の最大引張荷重を求める方法を行った。この時、試験片に曲げやねじりの変位がかかるよう留意した。

試験片作製上の理由から、接合界面はその法線方向が引張方向に対し30°の角度をなすように設定した。試験片が接合界面に沿って破断する場合には、界面の破断強度 σ_f を次式により算出した。⁽¹¹⁾

$$\sigma_f = F_t \cdot (\cos^2 \theta + 3\sin^2 \theta)^{1/2} / (T \cdot L) \quad (1)$$

ただし、 F_t ：破断荷重

θ ：破断面法線と引張軸のなす角

T, L：破断面寸法

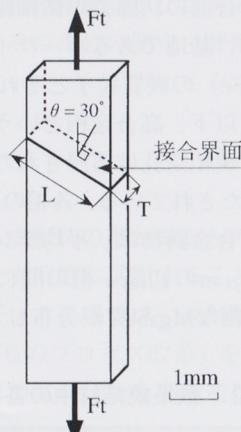


図2 引張試験片の概略図

引張試験はすべて室温で行った。初期の歪み速度は、 $1.2 \times 10^{-3}/\text{sec}$ とした。一部の試験片は、接合後、切斷

前に加熱炉にて所定時間加熱保持したのち、室温まで空冷し試験に供した。加熱温度はJIS AC4C材のT6処理の時効温度と同じ160°C、加熱保持時間は20時間とした。

2.3 解析

接合界面近傍の組織や剥離面の観察は、光学顕微鏡ならびに走査型電子顕微鏡を用いて行った。断面および剥離面の分析には、主として波長分散型EPMA面分析を用いた。

断面の硬度測定にはビッカース硬度計を用い、荷重は目的に応じてそれぞれ9.8 Nまたは0.25 Nを使用した。各荷重下の硬度Hv_{9.8}、Hv_{0.25}間の換算には、次式を用いた。

$$Hv_{0.25} = Hv_{9.8} + 10.3 \quad (2)$$

また、以下で用いる硬度の値は、原則として Hv_{0.25}の値とする。

3 結果

3.1 接合界面の構造

接合された界面の組織を図3に示した。鉄基焼結合金側では、接合前のものと比べ微細組織に差異は認められない。これに対し、アルミニウム合金側では、界面に沿って約150 μmの幅で共晶Si粒が消滅した組織帶が見られた。

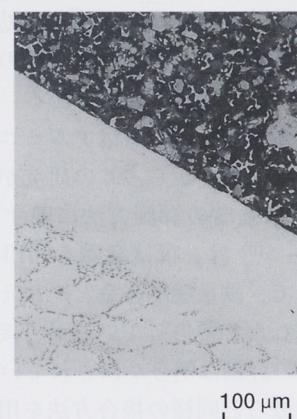


図3 接合界面の微細組織

複数の相からなる合金が接合された界面には、それぞれの材料に含まれる相の組み合わせの数だけ、種々の異なる界面が存在する。これらの接合界面は、それ程異なるレベルの接合強度を有していると考えられる。

界面の中で最も大きな面積率を占めるのは、鉄系焼結合金のパーライト相と、アルミニウム合金の α 相の組み合わせからなる界面である。このタイプの界面についてEPMA線分析を行ったところ、界面を境にして鉄ならびにアルミニウムの $K\alpha$ 強度線は交差し、界面からそれぞれ約 $1\mu m$ 離れた位置で母材強度レベルからバックグラウンドレベルへと変化した。EPMA線分析に用いた電子線径が約 $1\mu m$ であることを考慮すると、この界面近傍における鉄、アルミニウム原子の相互拡散層厚さは、 $1\mu m$ 以下とみなすことができる。

また、接合後加熱保持した試料についても同様の観察を行ったが、接合したままの状態との差異は認められなかった。

3.2 継ぎ手強度

引張試験の結果を図4に示した。

接合したままの状態での継ぎ手強度は、平均で約170MPaであった。破断はいずれの試料においても接合界面に沿って発生していた。アルミニウム合金母材の引張強度は約280MPaであることから、この試料の継ぎ手効率は約60%である。

一方、接合した試験片を 160°C で20時間加熱保持したものは、平均引張強度224MPaを示し、継ぎ手効率は約88%に増加した。

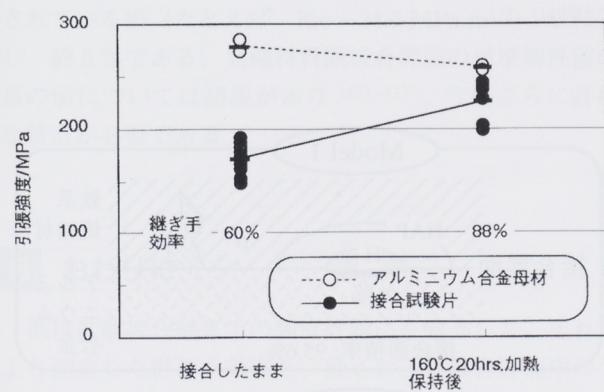


図4 引張試験結果

4 考察

代表的な鉄系焼結材側破断面のSEM観察ならびにEPMA面分析結果を、図5に示した。接合したままの試験片の破断面上にはディンプル状の凹凸が見られ、軟質層が破断様式を支配していたことを示唆している。同部のEPMA面分析からは、鉄系焼結材側の破断面を観察し

ているにもかかわらず、ほぼ全面にアルミニウムの分布が確認された。このことから、この試験片の場合、破断は接合界面ではなく、接合界面に沿ったアルミニウム合金側で生じたと考えられる。図3に見られるように、接合界面のアルミニウム合金側には共晶Si粒の消滅した層がある。この層は、接合時にこの合金系の共晶温度を上回ったことによって生じた相と考えられ、接合後の冷却速度が充分大きいことを考慮すると、一種の溶体化状態にあると考えられる。このため、この部分は人工時効による強化機構が解除されており、比較的大きな延性を示したものと考えられる。

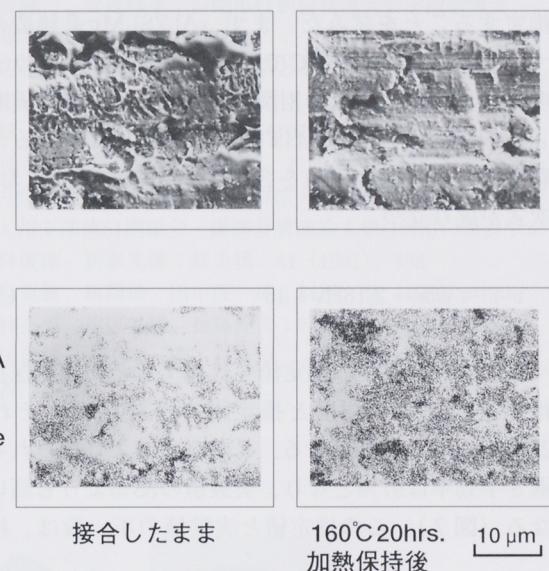


図5 SEM像およびEPMA像

一方、加熱保持した試験片では、破断面上のディンプルはほとんど認められない。EPMA面分析結果からは、依然としてアルミニウムがほぼ全面に検出されることから、界面近傍の熱影響相が時効により強化されたことにより継ぎ手強度が上昇し、延性が幾分低下したものと考えられる。

この推測を裏付けるため、接合界面のごく近傍のアルミニウム合金側断面について、0.25Nの微小荷重による硬度測定を行った。図6に測定結果を示す。接合したままの試験片では、界面近傍の熱影響相の硬度は約80Hvであり、アルミニウム合金母材の平均硬度110Hvに対し約30ポイント低い。時効温度で加熱保持を行うと同部の硬度は106Hvまで上昇し、母材とほぼ同等となる。このことから、界面近傍のアルミニウム合金は接合時に溶

体化状態となり、その後の時効硬化により母材強度に相当する強度まで回復する過程をとることがわかった。

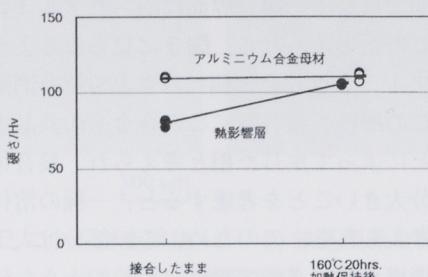


図 6 硬さ測定結果

上記の硬度測定結果から、加熱保持後の継ぎ手効率を推定することを試みた。まず、Al-7Si-Mg系鋳造合金について、溶体化後160°Cで時効した場合のビッカース硬度Hvと引張強度 σ_B の相関を求める⁽¹²⁾。推定破断強度 σ_f が引張強度 σ_B にはほぼ等しいものと仮定すると、実験で得られる硬度の値を含む限定された範囲において、次式が成り立つ。

$$\sigma_f \doteq \sigma_B = 2.18Hv + 46 \quad (3)$$

この式に、硬度の測定値を代入すると、加熱保持後の推定アルミ母材強度と推定継ぎ手強度は、それぞれ286MPa、277MPaとなる。これらの値より得られる推定継ぎ手効率は97%となり、実験値の88%よりも高い値となる(図7)。この推定値と実験値の不一致は、接合界

面の構造によるものであると考えられる。

表2に示したように、鉄系焼結材は主に4つの相からなっている。簡略化のためアルミニウム合金を均一相とみなすと、接合界面においては4種類の異なる強度の界面が存在することになる。継ぎ手の引張試験を行った場合、界面にはたらく平均引張応力の増加に伴い、接合強度の最も低い界面から順番に破壊が生じていくと考えられるので、最終的に得られる引張破断荷重は、最も接合強度の大きな界面(またはその界面近傍の材料)の強度とその面積率により決定されると推測される。この考え方から、2つのモデルを仮定した(図7)。Model 1は、硬質粒子-アルミニウム合金界面が先に破壊し、残りの部分の界面近傍アルミニウム合金側が破断強度に寄与していると仮定したものである。Model 2は、硬質粒子および溶浸銅相-アルミニウム合金界面が先に破壊し、あとはModel 1と同様と仮定したものである。このように仮定して計算した結果、Model 2による推定継ぎ手効率が、実験値と最もよい一致を示すことがわかった。

他方、前述の硬質粒子と溶浸銅相がアルミニウム合金と接している界面を接合界面上の欠陥と仮定し、平面上に複数のpenny-shaped cracksがM個×N個正方配列しているモデルから破壊部の破壊韌性を推定することを試みた。図8に示したモデルにおいて、欠陥の平均直径を2a、最近接欠陥の平均重心間距離をdとするとき、破断応力 σ_f と、残存界面の破壊韌性値Kicの関係は、次式で表される⁽¹³⁾。

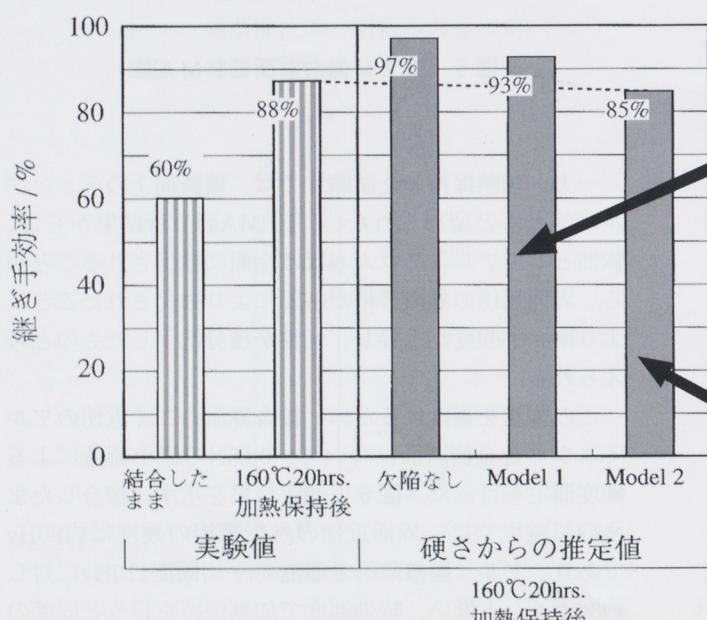
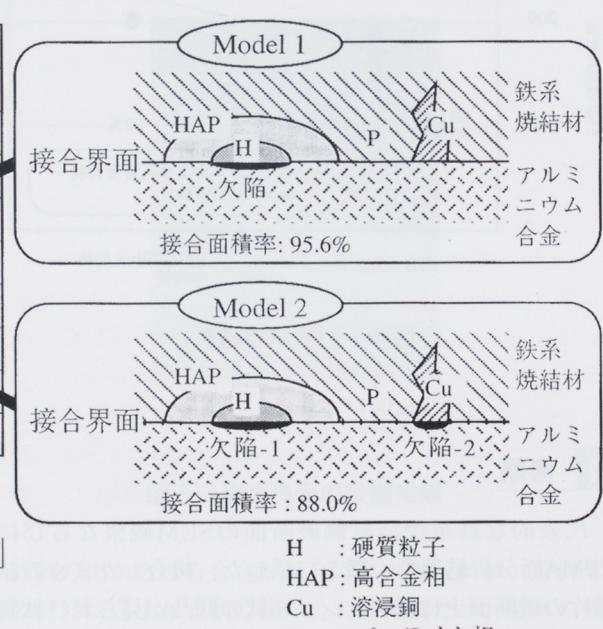


図 7 継ぎ手効率の推定



$$K_{IC} = \frac{2}{\pi} T \sigma_f \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

ここで、

$$T = 1/(1-\beta) \quad (5)$$

$$\beta = \sum_{M=-\infty}^{\infty} \sum_{N=-\infty}^{\infty} \left[-\frac{2}{\pi} \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{a}{\rho} \right) - \frac{a}{(\rho^2 - a^2)^{1/2}} \right\} \right] \quad (6)$$

$$\rho = d \sqrt{M^2 + N^2} \quad (7)$$

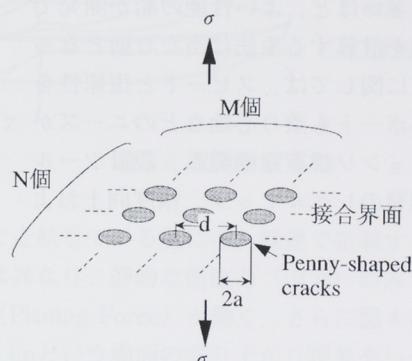


図8 接合界面モデル

式(4)に、測定値として $\sigma_f = 220 \text{ MPa}$, $a = 18 \times 10^{-6} \text{ m}$, さらに a および $d = 46 \times 10^{-6} \text{ m}$ から式(5)～(7)を用いて求められた $T = 1.1$ を代入すると、 $K_{IC} = 1.1 \text{ MPa m}^{1/2}$ となる。この値は、JIS AC4C-T6の破壊靭性値として測定されている値（たとえば、 $K_{IC} = 24.6 \text{ MPa m}^{1/2}$ ）⁽¹⁴⁾に対し、約5%である。異種材料間接合界面の破壊靭性値の真の値については諸説があり^{(15)～(17)}、今後さらに詳細な検討が必要である。

5 おわりに

抵抗拡散接合継ぎ手の強度評価法を確立した。それにより測定した継ぎ手効率と、硬さおよび接合界面中の欠陥を考慮して推定した継ぎ手効率を比較した。その結果、硬質粒子および溶浸銅がアルミニウム合金と接する界面を欠陥として考えた場合の推定値が、実験値と最もよい一致を示すことがわかった。さらに、多数の penny-shaped cracks を含むモデルを用いて、破壊靭性値の推定を行った。その結果、接合界面の K_{IC} は JIS AC4C-T6 の値の約5%であった。

終わりに、応力拡大係数の計算方法について、ご指導とご助言をいただいた九州大学工学部の村上敬宣教授ならびに、九州工業大学工学部の野田尚昭助教授に感謝の意を表します。

■参考文献

- (1) 川勝一郎、北山誠二：日本金属学会誌、40 (1976), 96
- (2) S. Elliot and E. R. Wallach : METAL CONSTRUCTION, 13 (1981), 167
- (3) E. R. Naimon, J. H. Doyle, C. R. RICE, D. Vigil and D. R. Walmsley : WELDING JOURNAL, 60 (1981), 17
- (4) 福田隆、岩館忠雄：鉄と鋼、76 (1990), 1293
- (5) 大路清嗣、中井善一、橋本真二：材料、39 (1990), 375
- (6) 迎静雄、西尾一政、加藤光昭：熱処理、32 (1992), 120
- (7) 伊妻猛志、外本和幸、藤田昌大、青柳宗伯：溶接学会論文集、10 (1992), 101
- (8) 外本和幸、伊妻猛志、安藤豪修、藤田昌大：溶接学会論文集、11 (1993), 17
- (9) 越智秀、小川恒一、山本義秋、橋永繁毅、菅泰雄、大西忠一：軽金属、46 (1996), 500
- (10) 稲波純一、安達修平：自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集、964 (1996), 365
- (11) 渡辺正紀、佐藤邦彦：溶接力学とその応用、朝倉書店、(1965), 580
- (12) 佃誠、鈴木敏夫：軽金属、29 (1979), 297
- (13) 野田尚昭、安達修平、柳下誠、村上敬宣：近似計算法による円盤状き裂の周期配列の応力拡大係数の解析、日本機械学会九州支部第51期総会・講演会講演論文集(1998)に発表予定
- (14) 小林俊郎、新家光雄：軽金属、41 (1991), 398
- (15) 浅見克敏、新開毅、田中俊一郎：材料、38 (1989), 490
- (16) 小林英男、荒居善雄、長島伸夫：材料、40 (1991), 689
- (17) 荒居善雄、土田栄一郎、宮垣淳二、吉野元基：材料、46 (1997), 952

●著者



久保田 剛



安達 修平