

大気雰囲気中における炭素鋼の拡散接合

安藤 正昭・宮野 泰治・進藤 錦悦

Diffusion Bonding of Carbon Steel in Air

MaSaaki ANDO, Taiji MIYANO and Kinetsu SHINDO

(平成元年10月31日受理)

Joint strength have been investigated by tensile test and Charpy impact test and carried out microstructure observation for bond interface and SEM observation for fracture surface. The work pieces (consisting 0.13%C, 0.46%C) for diffusion bonding were welded along the outside circumference at the bonding ends by TIG for isolating external atmosphere. The results obtained are summarized as follows;

- (1) TIG welding method for work pieces provides the possibility of diffusion bonding of carbon steel (SS41, S45C) in air environment.
 - (2) Parent metal fracture of bonded joints in tensile test were achieved under cyclic heating the range of A_1 transformation temperature (973~1013K).
 - (3) Impact value of diffusion bonded joints were remarkably inferior.
- Improvement of impact value is a matter of consequence for general application of diffusion bonding on structural materials.

1. はじめに

拡散接合は、材料を溶融することなく固相での拡散を利用することにより、異種材料や金属とセラミックスの接合等でも注目されており、ますますその適用範囲が広範となってきた。接合部の変形が少ないので、貴金属や装飾品などの接合をはじめ、軽金属の宇宙航空関係部品の接合などに、その実用性は高く認められている。

しかし、実用構造材料における拡散接合となると、強度的な信頼性などの面から、実用例は少なく、拡散接合継手の機械的性質を調べている報告例も多くはない。^{1)~3)}

拡散接合は、真空雰囲気中あるいは不活性ガス雰囲気中で行われているのが一般的であり、気密性の良いチェンバー内で行われている。これは雰囲気とともに接合部の形状や接合部材のサイズも制約を受けることになる。もっと簡便な方法での拡散接合が可能であれば、その適用は、さらに拡大されるものと考えられる。

Arや水素雰囲気中では、接合部に不活性ガスがボイドとなって残留するという報告例⁴⁾⁵⁾がある。大気中での報告例は、液相拡散接合など、いづれもかなり高温領域での実験例である。^{1)~8)}

そこで本研究は、効率的な熱エネルギーで、簡便な拡散接合を行なうことを目的として、構造用炭素鋼の大気中における接合を試み、継手の強度について調べられたものである。

2. 実験方法

本研究で用いた母材は、構造用炭素鋼のSS41およびS45Cであり、表.1に示すような化学組成をもつ。

表1 供試材料の化学成分

	(wt.%)					
	C	Si	Mn	P	S	Fe
SS41	0.13	0.22	0.41	0.011	0.024	Bal.
S45C	0.458	0.224	0.722	.0159	.0177	Bal.

母材は図.1のような形状寸法に仕上げられ、接合面は、研削加工(表面アラサHmax.0.4 μ m)、フライス加工(Hmax.4.6 μ m)およびエメリー紙研磨(#800-Hmax.0.2 μ m, #1200-Hmax.0.1 μ m)の3通りである。接合の前処理として、アセトン中で超音波によって脱脂洗浄した。その後、万力を改造した器具を用いて接合面を突き合わせ、9.8MPaで加圧しながらフランジ部の外周をTIG溶接して、大気雰囲気中接合の

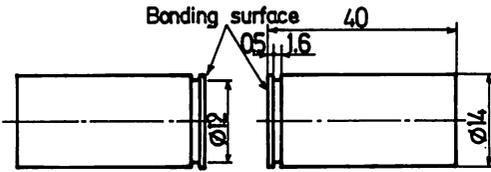


図1 接合試片の形状、寸法

試片とした。真空雰囲気中接合の試片には、TIG溶接は施されない。試片は、図.2あるいは図.3の装置にとりつけられ、加熱、加圧される。加熱はニクロム抵抗線発熱体による輻射加熱によって行ない、接合部の温度は、接合界面近傍にパーカッション溶接したCA熱電対によって測定され、設定温度の±5 K以内に制御した。加圧は、それぞれの装置でネジによる締付けと油圧プレスによって行なった。真空雰囲気は 10^{-2} Pa以下の真空度まで排気された。接合部の金属組織観察に用いた腐食液はナイトールである。継手の引張試験は、アムスラー型試験機とインストロン型試験機が用いられた。インストロン型による引張試験は、継手から旋盤加工した平行部直径8 mm、平行部長さ32mmの試験片で、ひずみ速度は1mm/分として行なった。また、接合界面にノッチを入れた3号試験片により、シャルピー衝撃試験が行なわれた。ただし、大気中接合試験片の断面寸法は、規格よりもわずかに小さい。引張試験後およびシャルピー試験後に、界面破断した破面のSEM観察が行なわれた。

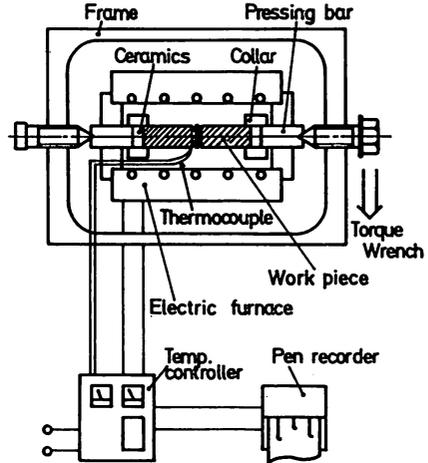


図2 接合装置 (大気雰囲気)

3. 実験結果と考察

3・1 SUS304—SS41

異種材料の方が拡散の確認が容易であると考えられるので、大気中での実験をはじめにあたり、ステンレス鋼(SUS304)と軟鋼(SS41)の異種材料を用いた。外周をTIG溶接されたSUS304-SS41試片を図2の装置により、無加圧のまま1173Kで15時間保持したときの界面の組織を写真1、写真2に示す。SUS304側には、界面から50～60 μ mにわたってCr炭化物が形成されており、また、界面および界面近傍の粒界には炭化物が集積されているのが認められる。

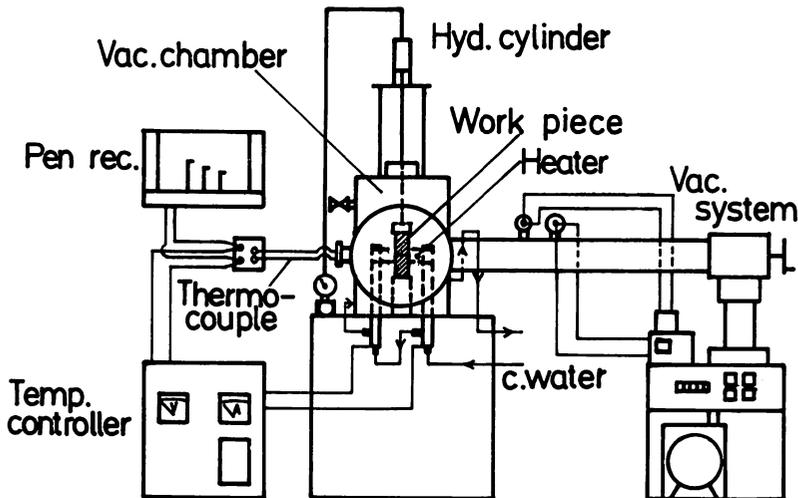


図3 拡散接合装置

大気雰囲気中における炭素鋼の拡散接合

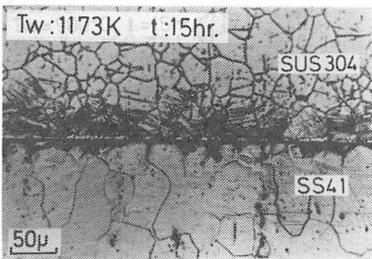


写真1
SUS304-
SS41界面

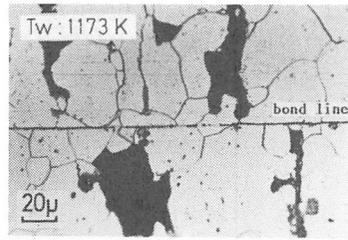


写真3
SS41接合界面

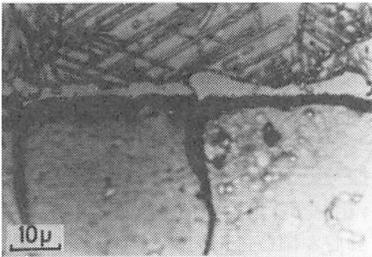


写真2
SUS304-
SS41界面

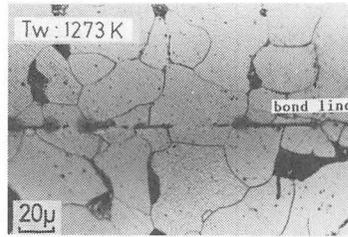


写真4
SS41接合界面

SS41側の素地のパーライト量も少ない。Cのみに着目する限りでは、CがSS41側からSUS304側に移動したものであると考えられ、SS41のパーライトおよびフェライトのCがオーステナイト側へ拡散したことを示すものである。

すなわち、外周をTIG溶接した試片で、大気雰囲気中においても拡散接合の可能性が充分あることが考えられる。

3・2 SS41-SS41

SS41同種材料について、3・1と同様の実験を行った。このとき、接合面は研削仕上げされたものであり、表面アラサはHmax.0.4μmである。1023~1273Kまでの温度範囲で、それぞれの温度での保持時間を30分としたときの継手の引張り試験結果を図4に示す。温度の上昇とともに引張り強さは向上して、1273Kで約150MPaの強度を得た。しかし、継手は全て界面で破断する。いま、接合時間を一定(30分)としているので、温度上昇とともに拡散が進行することは明らかである。1173Kと1273Kの接合界面の組織を写真3、写真4に示す。1173Kにおいては界面が鮮明であり、接合は進行していない。一方、1273Kとなると、界面を越えた結晶粒界が観察され、界面のポイドも消滅しはじめており、接合が進行していることが認められる。図4の温度上昇にもなった引張り強度の向上は、これらの組織写真で裏付けられる。

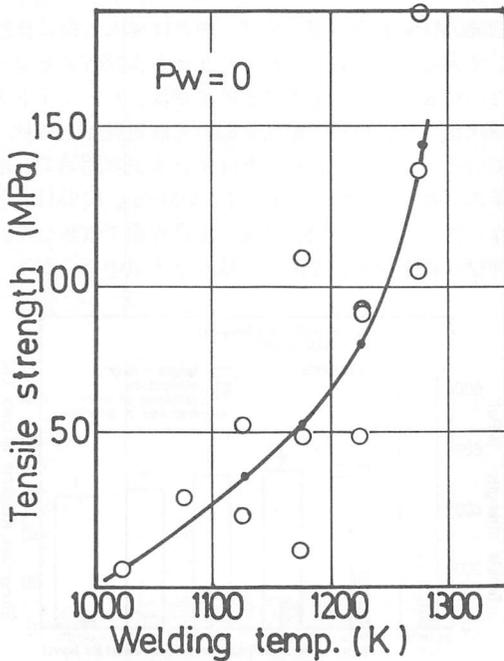


図4 接合温度と継手の引張り強さ (SS41)

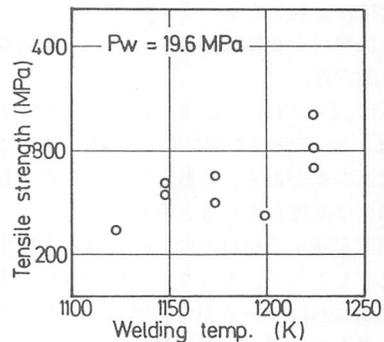


図5 接合温度と継手の引張り強さ (SS41)

拡散接合においては、拡散の他に温度と加圧力が重要な要素であり、いま、温度だけの影響が調べられた。

次に、19.6MPaで加圧した場合の結果を図5に示す。試片は図2の締付けネジによって行なわれ、加圧力はトルクレンチでキャリブレーションされている。加圧することにより、1223Kで引張り強さが約340MPaほどとなる。さらに高温にすれば、強度の大きい継手が得られるはずであるが、試片および加圧棒の変形量が大きくなり、実験は困難である。このように引張り強さは増すものの、継手は全て接合界面で破断し、母材の約50%程度の強度しか得られない。

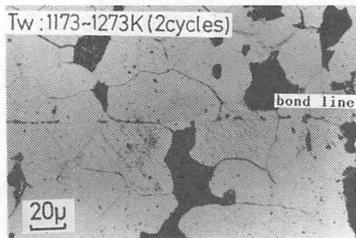


写真5 SS41接合界面

加圧とともに、接合温度を1173~1273Kで2回の繰返し加熱をしたときの組織を写真5に示す。ポイドは残っているが、界面は大分消失し、界面を横切って結晶粒の成長が認められる。これは高温での保持時間が長くなったことと、繰返し加熱することによって拡散係数が変動して、接合が進展するものと考えられる。しかし、試片の変形が著しいので、軟鋼(SS41)材に、拡散接合を適用するメリットは低いと言える。

3・3 S45C-S45C

炭素含有量が0.20%以下の鉄鋼については、一般的な溶融溶接も容易である。炭素量が高くなり、0.3%以上となると、チル化や割れ等の問題のために、溶融溶接は不利となる。そこで、S45Cにおいて、繰返し加熱による拡散接合を行ない、機械的性質について調べた。

図6は、Feにおける温度と拡散係数を示す。拡散係数は、 A_3 変態点を境にして、 α 相と γ 相で2オーダーほどの差がある。拡散係数のみで考えれば、同相の場合は温度が高いほど有利といえるが、Feのように同素変態する材料の変態点付近の温度帯については必ずしも当てはまらない。Feは α 相の方が拡散係数が高いわけであるから、熱エネルギーの効率などから考えて、できるだけ低温側の温度帯ということと、拡散係数を変動させる意味で、 A_1 変態点の上

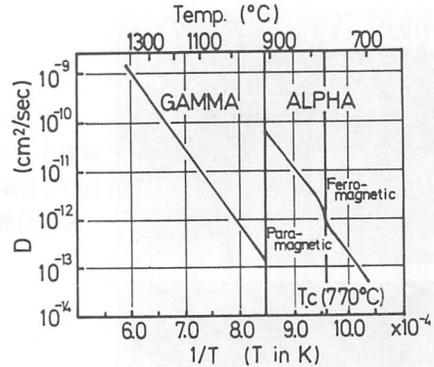


図6 Feの拡散係数

下を繰返し加熱する接合を試みた。すなわち、 α 相と部分的に γ 相となる温度領域の繰返し加熱である。図3の装置を用いて、加熱の温度帯は973~1013Kとし、5回のサイクリングをした。試片は、サイクリングが終了するまでに油圧ポンプにより、24.5MPaに加圧され、973K以上に保持される時間は約40分間である。得られた継手の引張り試験結果を図7に示す。引張り試験は、それぞれの条件による3本の試験による平均値で表わされている。受入材は丸棒の加工による縞状組織などで、850MPaの引張り強さを持つ。この材料を、接合条件の973~1013Kを5回サイクリングしたとき、引張り強さは約550MPaとなるが、伸び、絞りはいずれも受入れ材に比較して大幅に向上し、それぞれ26%および67%となった。 A_1 変態点を上下させる温度帯は、パーライトを球状化させ、材料の靱性を高める熱処理域と一致している。このとき、真空雰囲気と大気雰囲気での継手の引張り強さは、それぞれ530MPa、515MPaとなった。そして、継手は全て接合界面で破断した。伸びは真空中接合が高く、絞りは大気中接合が高い

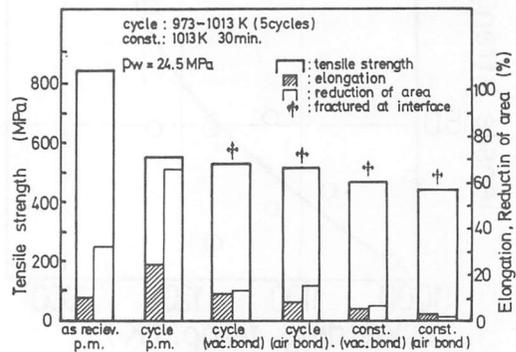


図7 継手の機械的性質 (S45C)

大気雰囲気中における炭素鋼の拡散接合

値を示す結果となった。これらの結果は、それぞれ3本の試験片の平均値であることを考慮すれば、真空中と大気中での接合継手の強度には大きな差異はなく、ほとんど同レベルと考えられる。継手が母材の強さまでに達していないことと、全ての継手が界面破断することは、接合が不十分であることを意味しており、接合条件の検討を要する。また、1013K一定としたときは、真空中、大気中ともサイクリングしたときの強度よりも低い。それぞれの組織を写真6、写真7、写真8に示す。真空中の接合界面の方が大気中のものに比較して、接合状態は良好である。つまり、界面に沿って観察されるポイドあるいは炭化物が、真空中の方が少ないからである。また、真空中の方がパーライトの球状化が進んでいることが認められる。大気中接合の試片の外周は、大気を遮断する意味でTIG溶接されたものであるが、もともと、Feは酸素および窒素を固溶するものであるから、接合時の加熱にともなって、何らかの反応があることは推察される。

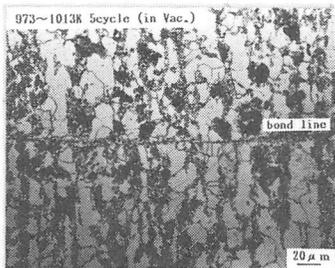


写真6
S45C接合界面
(真空中)

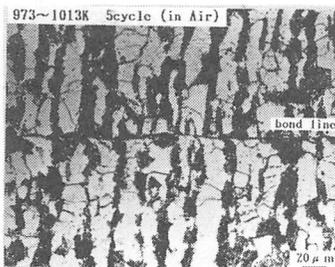


写真7
S45C接合界面
(大気中)

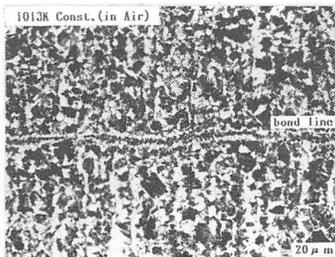


写真8
S45C接合界面
(大気中)

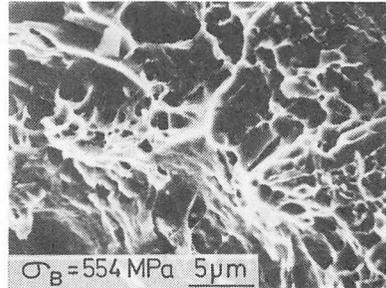


写真9 引張り破面SEM (真空中)

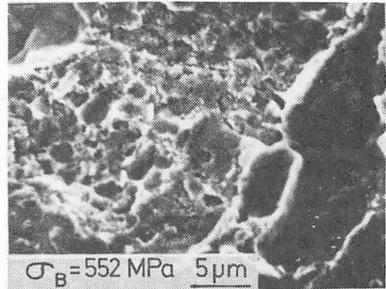


写真10 引張り破面SEM (大気中)

写真9、10は、真空中と大気中での継手の引張り試験後の破面SEM写真である。引張り強さはほとんど同じ値を示すにもかかわらず、破面の呈する形態には、すこぶる大きな違いがある。引張り試験によって得られる引張り強さは、材料の変形に対する抵抗力である。しかし、変形に対する抵抗力がほぼ同じとしても、写真9、10からは、2つの破面の変形能は、とうてい同じとは推定できない。真空中接合の継手の方が変形能が大きいと判断できることは、写真から明らかである。従って、継手の強度を、引張り強さだけで評価するのは妥当ではないと考えられ、衝撃試験によって変形能も調べることが必要である。

引張り試験片は、全て接合界面で破断したものであるが、破面をさらに詳細に観察した結果、写真11に示すように、ディンプル中に介在物が存在してい

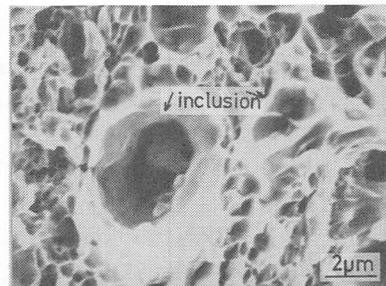


写真11 引張り破面SEM

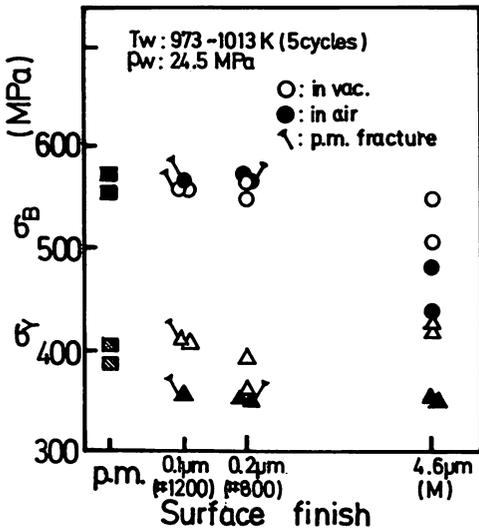


図8 表面仕上げと継手の機械的性質

る。この介在物は分析していないので特定できないが、表面仕上げの際の砥粒ではないかと推定する。接合面の仕上げに研削を用いたのは、精度の良い表面アラサが容易に加工できることと、端面の平行度も保証できるからである。硝削盤によって仕上げられた金属表面には、無数の砥粒がメリ込むことは良く知られている。接合面に砥粒が存在している可能性があることは、接合面の研削加工は適当でない。そこで、フライス盤による端面仕上げと、エメリー紙研磨による接合面についての実験が行われた。フライス仕上げで得られた表面アラサは、 $H_{max.} = 4.6 \mu m$ 、エメリー紙研磨によって、#800では $H_{max.} = 0.2 \mu m$ 、#1200では $H_{max.} = 0.1 \mu m$ である。同じ接合条件のもとで得られた継手の、引張り試験結果を図8に示す。接合面表面アラサ $0.1 \mu m, 0.2 \mu m$ の継手は、真空中および大気中とも母材並みの強さを示し、また、母材破断する。接合面の表面アラサと接合強度については多くの報告がある。⁹⁾¹⁰⁾ 真空中と大気中において、引張り強さの差異はないと言えるが、降伏点については、大気中の方が低い。引張り強さに関しては、真空中および大気中でも、ほぼ母材並みの強度を有する継手を得られたことになる。

図9に、シャルピー衝撃試験の結果を示す。ここで、継手から衝撃試験片を製作するとき、大気中接合の試片は外周のTIG溶接部の溝を切削するために、3号試験片の規格寸法よりも断面寸法がいくぶん小

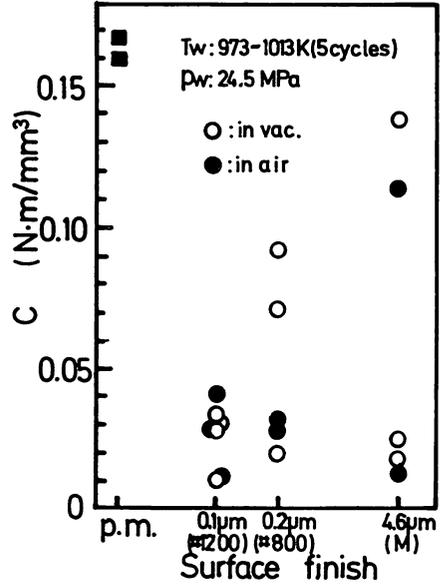


図9 表面仕上げと継手の衝撃値

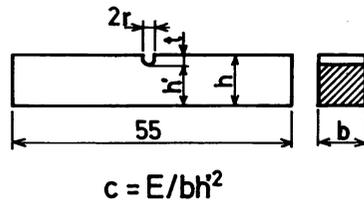


図10 シャルピー衝撃試験片

さく仕上がる。切欠きを有する試験片の衝撃値は、一般に相似の法則が成立しないが、衝撃吸収エネルギーをノッチ部の断面積で除し、更に、図10に示す h' で除することによって、試験片寸法に影響されない材料本来の衝撃値が得られる。¹¹⁾ 図9の縦軸は、この値Cで取り扱ったものである。この結果、継手の衝撃値は、母材の1/3にも満たない。写真12は、シャルピー試験後の破面のSEM写真である。接合部分と未接合部分が認められ、接合部分での延性破壊部と擬へき開部が現われている。

拡散接合継手の衝撃値は極めて低い。継手の強度的な信頼性を高めるために、衝撃値についても、さらに改善、検討されねばならない。

大気雰囲気中における炭素鋼の拡散接合

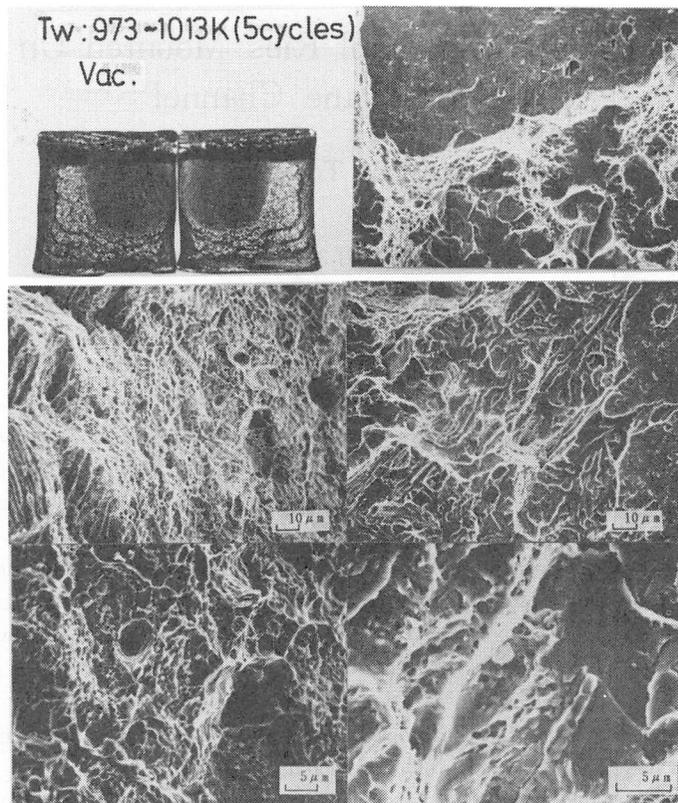


写真12
シャルピー衝撃試験
破面SEM

4. 結 言

本研究は、炭素鋼の大気雰囲気中における拡散接合を試みて、接合部の金属組織、継手の引張試験、衝撃試験およびSEM観察などから、継手の強度について調べられたものである。すなわち、図1のような試片の外周をTIG溶接した後拡散接合して、真空雰囲気中で接合したものと継手強度について、比較検討された。得られた主な結果は、次のようにまとめられる。

- (1) 外周をTIG溶接する方法で、大気雰囲気中において炭素鋼の拡散接合が可能である。
- (2) S45C (0.46% C) 材で、 A_1 変態点上下を繰り返し加熱することによって、引張り試験において母材破断となる継手が得られた。
- (3) 引張試験で継手は母材破断となるものの、継手の衝撃値は極めて低い。

おわりに、本研究にご協力いただいた本校技官の方々をはじめ、卒研学生に感謝いたします。また、実験の一部は、大阪大学溶接工学研究所共同利用によって行なわれたことを記して、感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) S.ELLIOT, I.A.BUCKLOW and E.R.WALLACH: JOURNAL of MATERIALS SCIENCE 15(1980)2823-2833
- 2) C.E.THORNTON and E.R.WALLACH: JOURNAL of MATERIALS SCIENCE 18(1983)1433-1442
- 3) B.DERBY and E.R.WALLACH: JOURNAL of MATERIALS SCIENCE 19(1984)3149-3158
- 4) 大橋 修:溶接学会論文集,4(1986)No.3, 514-520
- 5) 大橋 修, 雀部 謙: 溶接学会論文集,2(1988)No.1, 98-103
- 6) THOMAS J. MOORE and KENNETH H. HOLKO: WELDING JOURNAL MARCH (1972)106S-116S
- 7) 小嶋敏文, 上野泰弘, 影近 博, 渡辺 之: 溶接学会全国大会講演概要, 39(1986)90
- 8) 三浦 実:溶接学会全国大会講演概要, 41(1987)39
- 9) 大橋 修, 橋本達哉:1975溶接学会秋季全国大会
- 10) 桃野 正, 圓城敏男: CAMP-ISIJ Vol.1(1988)440
- 11) 山田良之助:材料試験 内田老鶴圃(1979), 130-141