

## 技術資料

## 溶融Zn系めっき鋼板アーク溶接継手の引張強さにおよぼすブローホールの影響

黒部 淳\* 東 努\*\* 朝田 博\*\*\*

Influence of Blowholes on Tensile Strength of Arc-Welded Joint in Zn and Zn-Al-Mg Alloy Coated Steel Sheets

Jun Kurobe, Tsutomu Azuma, Hiroshi Asada

## Synopsis :

In arc-welding of zinc or zinc-based alloy coated steel sheets, blowholes, i.e., the pores formed in the weld metal due to trapping bubbles of vaporized zinc therein, often bring about a remarkable degrade of the mechanical properties of the joint. In this work, the influence of blowholes on tensile strength of weld joints using zinc or Zn-6%Al-3%Mg alloy coated steel sheets has been evaluated by a tensile test with newly designed test pieces for butt welding. When the ratio of the summation of each blowhole diameter except overlap length to welding length, defined here as "blowhole fraction" was less than 30%, the tensile strength of joint is almost same as that of the base metal. On the contrary, when the fraction was higher than 30%, the butt arc-welded joint fractured in the weld metal, and its tensile strength was lower than that of the base metal.

## 1. 緒言

溶融Zn系めっき鋼板は、部品の高耐食性要求に対応して自動車、プレハブ住宅、家電などの多分野で使用されている材料であり、種類としてはZnめっき鋼板やZn合金めっき鋼板がある<sup>1-2)</sup>。Zn合金めっき鋼板の中でもZn-6mass%Al-3mass%Mgめっき鋼板は、非常に優れた耐食性を有しており、近年プレハブ住宅の建築部材をはじめとするさまざまな用途への採用が広がってきている<sup>1)</sup>。また、自動車の足廻り部品やプレハブ住宅の構造体を溶融Zn系めっき鋼板で製造する場合には、一般的にCO<sub>2</sub>アーク溶接やMAG溶接が施されている<sup>3-4)</sup>。

溶融Zn系めっき鋼板をアーク溶接した場合は、スパッタ、ヒューム、あるいはブローホールの発生が冷延鋼板の場合と比べて多くなる現象があり、これらはいずれもめっき層中のZnが蒸気化することによって引き起こされている<sup>4-5)</sup>。特にブローホールは、溶接金属内に欠陥として存在することから、その低減は溶接品質上の重要な課題の一つである。これまでに突合せ溶接継手よりも重ね隅肉溶接継

手で発生しやすい特性があることや<sup>4-15)</sup>、その欠陥の防止策として溶接電流波形や溶接ワイヤー成分などを適正化する溶接方法が報告されている<sup>4-5, 7-10, 13-15, 18-26)</sup>。

しかし、ブローホールが溶接金属内に発生した場合に最も大きく影響を受けるのは、接合強度に対する有効断面積が減少することによる溶接継手強度の低下であるが、ブローホール多発による強度低下を唱える報告<sup>3, 12)</sup>はあるものの、定量的な評価を行ったものはない。そのため本研究では、主にZn-6mass%Al-3mass%Mgめっき鋼板を用い、溶接継手強度に及ぼすブローホール発生量の影響を検討した。溶接継手強度評価としては静的な引張強さを対象とし、溶接継手形状は引張試験時の試験片変形の影響を除外するため突合せ溶接継手を主体に評価を行った。

## 2. 実験方法

## 2.1 供試材

実験に用いた供試材のめっき種、めっき付着量、母材

\*加工技術研究部 加工第二研究チーム チームリーダー  
\*\*加工技術研究部 加工第一研究チーム  
\*\*\*加工技術研究部 加工第一研究チーム チームリーダー

の主成分を表1に、機械的性質を表2に示す。溶融Zn系めっき鋼板としては、Zn-6mass%Al-3mass%Mgめっき鋼板（以下、ZAMと記す）を選択し、比較材として

表1 供試材の主仕様

Table 1 Materials used

めっき種	めっき付着量(g/m <sup>2</sup> )	板厚(mm)	母材の化学成分(mass%)				
			C	Si	Mn	P	S
Zn-6mass%Al-3mass%Mg	75	4.2	0.139	0.005	0.55	0.016	0.0050
Zn-0.2mass%Al	75	4.2	0.148	0.003	0.54	0.019	0.0070

表2 供試材の機械的性質

Table 2 Mechanical properties of materials

めっき種	降伏応力(N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	全伸び(%)
Zn-6mass%Al-3mass%Mg	322	442	35.8
Zn-0.2mass%Al	300	429	39.0

Zn-0.2mass%Alめっき鋼板（以下、Znめっき鋼板と記す）を用いた。これによりめっき金属の組成によるブローホール発生量を比較した。

## 2.2 溶接方法

アーク溶接は、CO<sub>2</sub>溶接を用い、表3に示す溶接条件にて実施した。溶接は、図1に示すように供試材と同じ

表3 溶接条件

Table 3 Welding conditions

溶接方法	CO <sub>2</sub> アーク溶接
溶接速度(m/min)	0.3
溶接ワイヤー/ワイヤー径(mm)	ソリッドワイヤー(YGW12)/φ1.2
シールドガス/流量(l/min)	CO <sub>2</sub> /15.0
溶接電流(A)	150~240
アーク電圧(V)	20~24

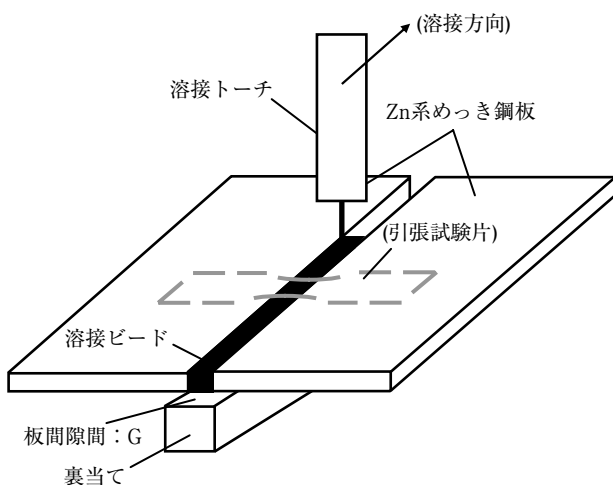


図1 溶接方法

Fig. 1 Welding method.

めっき種の材料を裏当てとして設置した状態で行い、供試材と裏当て間の隙間Gの調整でブローホール発生量を変化させた。また、溶接ワイヤーは直径1.2mmのソリッドワイヤーとし、JIS Z 3312で規定されるYGW12を用いた。

## 2.3 引張試験片の製作方法

本実験での溶接継手強度の評価としては、静的引張試験による引張強さを指標として用いた。引張試験は、突合せ溶接継手サンプルの余盛と溶接時に設置した裏当てを切削により除去し、溶接金属部分の板厚をほぼ一定とした状態からJIS Z 2201で規定される5号試験片を切り出して実施した。試験片の切り出し位置としては、裏当てと余盛を除去したサンプルのブローホール発生状況をX線透過試験法により確認し、その結果を基にブローホール発生量の異なる部位を選択した。

## 2.4 ブローホール発生量の評価方法

ブローホール発生量の評価方法は、一定長さの溶接ビード長当りの発生個数を評価する方法<sup>19, 22, 25)</sup>と、発生したブローホール直径を積算して溶接ビード長に対する比率で評価する方法<sup>20, 21, 26)</sup>が報告されている。発生個数で評価する方法では、ブローホール寸法に分布があるため溶接継手の引張強さに及ぼすブローホールによる溶接金属の断面積減少の影響を定量的に把握することは困難である。また、ブローホール発生量によっては、引張試験を行った際に溶接金属内で破断するのではなく母材部分で破断する場合も予想されることから、破断面から溶接金属の断面積を測定できず、非破壊検査によって評価する必要がある。

引張試験により溶接金属内で破断した溶接継手断面を観察すると図2に示すように溶接金属内の板厚方向におけるブローホールは、複数個存在せず、1個のプロ

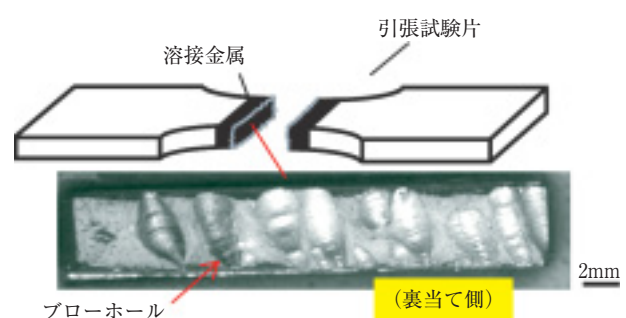


図2 溶接金属破断サンプルの破面におけるブローホール形状の一例

Fig. 2 Example of the shapes of blowholes on fractured surface in weld metal.

ーホールが溶接金属の板厚方向全体に渡って成長しているものがほとんどであることが判明した。そこで本実験では、これまでの報告例<sup>20, 21, 26)</sup>を参考にして溶接ビードの余盛と裏当てを切削した突合せ溶接継手サンプルの表ビード側よりX線透過試験を行ってブローホールを検出した。

その結果を基に図3に示す溶接金属のブローホール直径d1~dnを測定するとともに、それらの測定値を用いて式(1)に示す溶接ビード長Lに対するブローホール直径の積算値の比率でブローホール発生量を評価した。また、その比率をブローホール占有率Bsと名称し、ブローホール発生量を評価する指標とした。

$$Bs = (d1 + d2 + d3 + d4 + d5 + \dots + dn) / L \dots \dots (1)$$

ただし、ブローホールの発生位置は、溶接金属内に一列の状態が発生しているのではなく複数列に渡って発生しているため、発生位置が重なっている場合は図3のd3に示したように重なり長さを除外してブローホール直径を測定した。

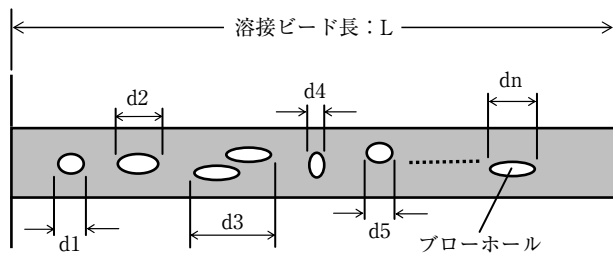


図3 ブローホール直径の測定方法  
Fig.3 Measurement method of diameter of blowhole.

### 3. 実験結果

#### 3.1 突合せ溶接継手サンプルの状態

図4に突合せ溶接継手サンプルの溶接ビード外観とX線透過試験結果の一例として、板間隙間Gを0mmで溶接したZAMの場合を示す。溶接ままの溶接ビード表面においてはそのビード表面の空孔として一般に定義されているピットの発生は認められなかったが、溶接ビードの余盛と裏当てを除去するとブローホール発生による空孔が確認された。またX線透過試験結果より、ブローホールの存在は溶接金属中で一列に配列されておらず複数列に渡っているが、ほぼ裏ビード幅の領域で発生していることが判明した。また、溶接ままのサンプルにおける溶接金属の厚みや表および裏ビードの幅寸法は、ZAM

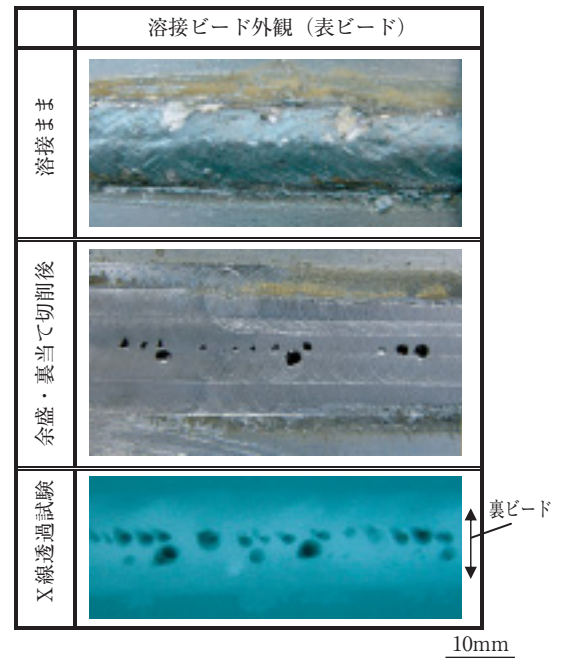


図4 突合せ溶接継手サンプルの溶接ビード状態とX透過試験結果の一例  
(ZAM, G=0, YGW12)  
Fig.4 Example of butt arc-welded joint.  
(ZAM, G=0, YGW12)

とZnめっき鋼板とではほぼ同じであった。

#### 3.2 ブローホール発生量

##### 3.2.1 めっき種および隙間Gによる比較

溶接ビード長が900mmでのブローホール占有率Bsの比較結果を図5に示す。隙間Gを与えることにより、ブローホール占有率は低くなる傾向を示した。これは、隙間からZn蒸気が排出しやすくなるためと考えられる。めっき種の比較においてZAMの全体的なブローホール占有率Bsは、Znめっき鋼板よりも低くなる結果で

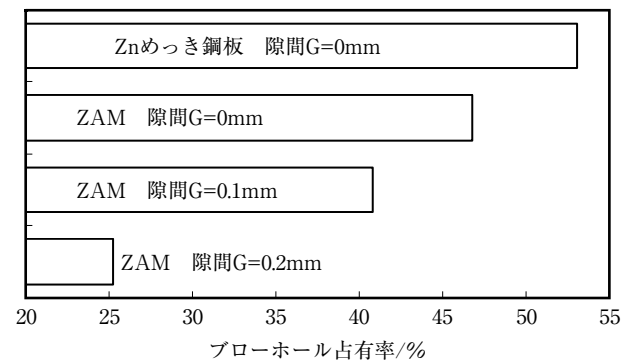


図5 ブローホール占有率の比較  
Fig.5 Comparison in blowhole fraction.

あった。このようにめっき種によってブローホール占有率Bsが異なる原因としては、めっき層中のZn含有量の違いによりZn蒸気量が異なることがまず考えられる。また、もう一つの原因としては、溶融池の粘性によるZn蒸気の排出状況の違いが考えられる。そのため、供試材のめっき成分の溶接金属への混入状況をプラズマ発光分光分析法により調査した結果を図6および7に示す。ZAMの溶接金属成分でZnめっき鋼板と異なるのはAl量であり、Znめっき鋼板と比較して2倍以上多く混入していることが判明した。それらの結果より、ブローホール占有率Bsの結果に対する考察を、本実験での溶接継手サンプルにおけるZn蒸気の推定挙動を基

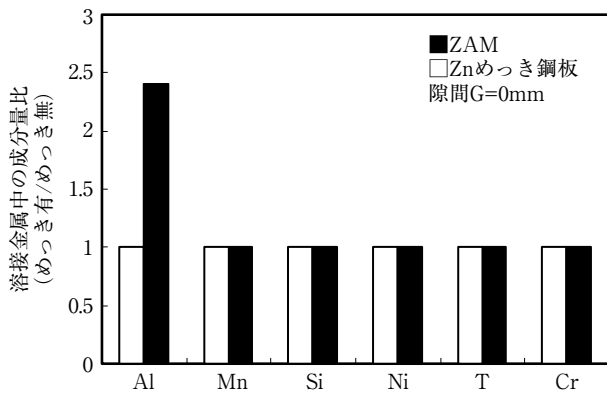


図6 溶接金属内の成分比率  
Fig. 6 Ratio of chemical contents in weld metal.

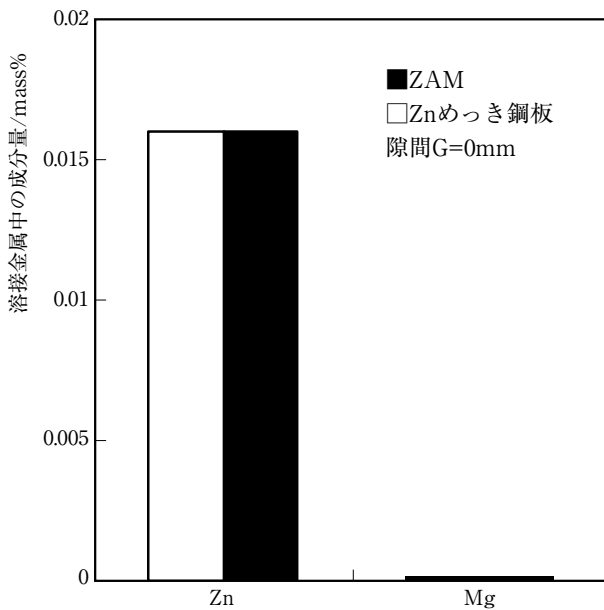


図7 溶接金属内の成分  
Fig. 7 Chemical contents in weld metal.

にして行った。

Zn蒸気は裏ビードの周辺や裏当てのめっき層から発生して表ビード側から排出することが予想され、Zn蒸気の発生量は裏ビード幅に左右されると考えられる。Znめっき鋼板とZAMの裏ビード寸法はほぼ同じであったことから、ZAMにおいてブローホール占有率Bsが低かった原因はめっき層中のZn含有量が少ないこと<sup>16)</sup>と溶融池にAlが混入して粘性が低下<sup>27)</sup>したことによりブローホールが排出しやすくなったためと考えられる。

図8にZAMとZnめっき鋼板とのブローホール直径と発生数の比較結果を示す。ブローホールの全発生数は、ZAMが282個、Znめっき鋼板が384個と、ZAMの方がZnめっき鋼板よりも少なくなった。また、ブローホール直径ごとの分布では、ZAMの方がZnめっき鋼板よりも直径が大きいブローホールが多く発生する傾向が見られた。

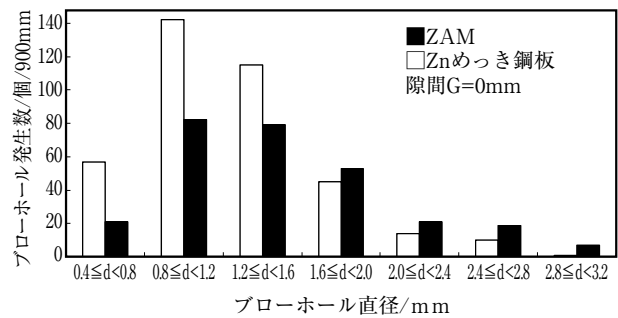


図8 ブローホール直径の分布  
Fig. 8 Distribution of blowhole diameter in weld metal.

このようにめっき種によってブローホール直径の分布状態が異なる原因としては溶融池中で発生した個々のブローホールの合体が考えられる。つまり、ZAMとZnめっき鋼板でブローホール直径の発生分布が異なるのは、ZAMをアーク溶接した場合に溶融池がめっき層成分のAlの混入で粘性が低下<sup>27)</sup>して、個々のブローホールが浮上する過程で合体しやすくなることが原因であると考えられる。

### 3.3 溶接継手の引張強さ

本実験での引張試験では、ブローホール占有率Bsによっては溶接金属内で破断する場合もあったことから、その破断した試験片の破面を利用してX線透過試験から求めたブローホール占有率Bsの整合性を確認した。破面観察でのブローホール直径としては、最大径を選択した。ただし、ブローホール発生位置が重なっている場合は重なり長さを除外してブローホール最大径の積算値を

算出した。比較した結果を図9に示す。破面観察より測定したブローホール占有率Bsの方がX線透過試験結果から測定した値より若干高くなっていた。このことから、本実験で採用したX線透過試験によるブローホール占有率Bsは溶接部品質に対しては安全側の数値になっていると言える。

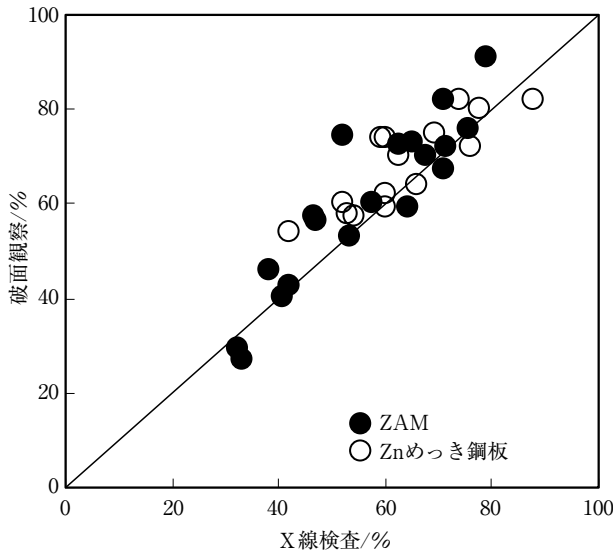


図9 調査方法によるブローホール占有率の比較  
Fig.9 Comparison of blowhole fraction between view of fractured surface and radiographic examination.

図10および11にブローホール占有率Bsに対する引張強さの傾向を示す。めっき層を除去した供試材でブローホール占有率Bsが0%である場合においては、母材で破断しており、引張強さも供試材のそれとほぼ同等であった。また、ZAMおよびZnめっき鋼板の場合は、ある一定以上のブローホール占有率Bsに達すると引張強さが低下して溶接金属で破断していた。具体的には、ブローホール占有率Bsが約30%までは母材破断となり引張強さもほぼ一定であったが、30%を超えた場合は溶接金属破断となり引張強さはブローホール占有率Bsの増加とともに低下した。つまり溶接継手の引張強さは、溶接金属内のブローホールの存在有無のみで左右されないことが判明した。

3.4 前面隅肉溶接継手の引張強さ

3.3項で示したように突合せ溶接継手の引張強さにおよぼすブローホールの影響はブローホール占有率Bsで定量的に整理することができたが、その結果がブローホール発生量の比較的多い重ね隅肉溶接継手に対しても適用することが可能かを検討した。溶接継手としては、重ね隅肉溶接継手の引張試験時に発生する変形を抑制するた

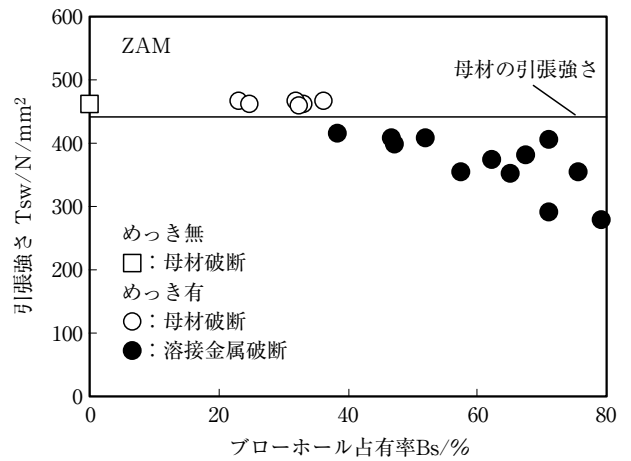


図10 溶接継手の引張強さに及ぼすブローホール占有率の影響 (ZAM)  
Fig.10 Effect of blowhole fraction on tensile strength (ZAM).

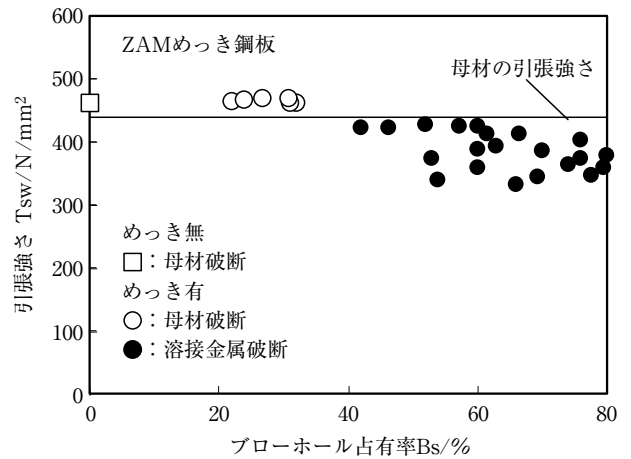


図11 溶接継手の引張強さに及ぼすブローホール占有率の影響 (Znめっき鋼板)  
Fig.11 Effect of blowhole fraction on tensile strength (Zn-0.2mass%Al coated steel sheet).

めJIS Z 3131で規定された前面隅肉溶接継手を用いた。前面隅肉溶接継手の構成は、図12に示すように上下の

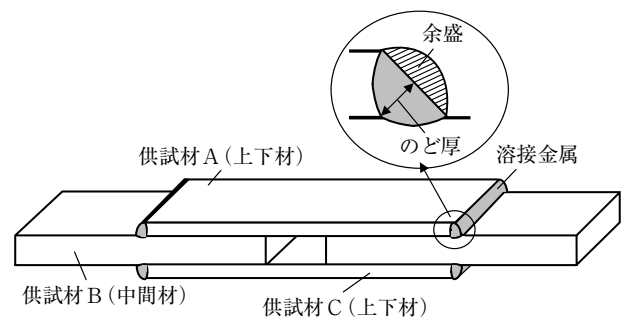


図12 前面隅肉溶接継手の概要  
Fig.12 Schematic diagram of front fillet welded joint.

供試材AとCの板厚を引張強さに対するブローホール占有率Bsの影響が顕著に現れるように間に挟んだ供試材Bの1/2の厚みとした。アーク溶接は表3の溶接条件に従って行い、のど厚を統一するために余盛を削除した。この溶接継手サンプルでは4個の溶接金属が存在するが、それぞれの溶接金属内におけるブローホール発生状況を個別にX線透過試験で確認できないことから、ブローホール占有率Bsは実際に溶接部で破断した面の破面観察からのみ測定した。前面隅肉溶接継手を用いた引張強さに対するブローホール占有率Bsの影響を図13に示す。破断位置は、ブローホール占有率Bsが0%の場合は供試材AまたはCの母材部であり、ブローホール占有率Bsが30%を超えると溶接金属内であった。また、引張強さは、突合せ溶接継手の場合と同じようにブローホール占有率Bsが約30%を超えると低下する傾向となった。つまり、重ね隅肉溶接継手および突合せ溶接継手とも、溶接継手の引張強さに及ぼすブローホールの影響は同じ傾向を示すことが確認できた。しかしながら、母材破断となるブローホール占有率Bsについては明確な限界値が得られていないことから、さらに詳細な調査が必要であると考えられる。

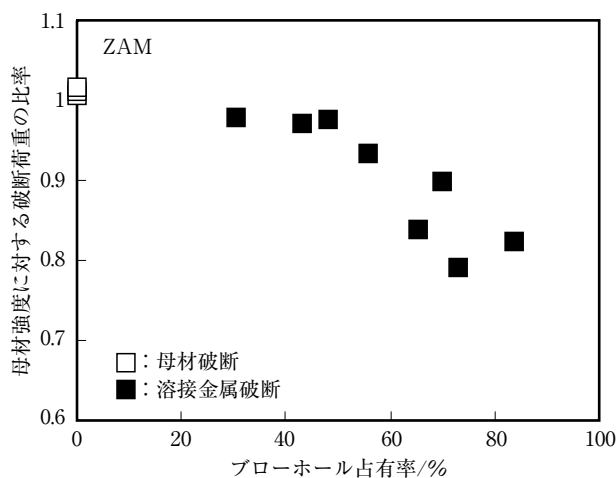


図13 溶接継手の引張強さに対するブローホール占有率の影響 (前面隅肉溶接継手)

Fig.13 Effect of blowhole fraction on tensile strength (front fillet welded joint).

#### 4. 結 言

本研究では、溶融Zn系めっき鋼板をアーク溶接した溶接継手の静的引張強さに及ぼすブローホール発生量の影響を、突合せ溶接継手を主体に検討を行った。以下に主な結果を示す。

- (1) 本研究でのブローホール発生量の評価にはX線透過試験から算出したブローホール占有率Bsを用いたが、その値は溶接継手の引張試験で溶接部破断したサンプルの破断面から求めたブローホール占有率Bsより若干高くなっていた。これは、X線透過試験を用いて算出したブローホール占有率Bsが実溶接部品質に対して安全側の数値になってことを示唆している。
- (2) Zn-6mass%Al-3mass%Mgめっき鋼板ではZn-0.2mass%Alめっき鋼板に比べて直径の大きなブローホールの発生数が多く、直径が小さいブローホールは少ない傾向が見られた。これは、めっき層中のAlが溶融池に混入することにより粘性が低下して、個々のブローホールが合体しやすくなることが原因であると考えられる。
- (3) Zn-6mass%Al-3mass%Mgめっき鋼板の方がブローホール占有率Bsが低くなる結果であった。これは、Zn-0.2mass%Alめっき鋼板と比べてめっき層中に含まれるZn量が少なく発生するZn蒸気も少ないことと、溶融池の粘性が低下することによりZn蒸気が排出されやすいことが原因であると考えられる。
- (4) 突合せ溶接継手の引張強さの推移は、ブローホール占有率Bsが30%までは母材破断となり引張強さもほぼ一定であったが、30%を超えると溶接金属破断となり引張強さもブローホール占有率Bsとともに低下した。また、このような傾向は、めっき種に関係なく同じであった。
- (5) 重ね隅肉溶接継手の引張強さは、突合せ溶接継手の場合と同様にブローホール占有率Bsが約30%を超えると低下する傾向となった。

## 参考文献

- 1) 安藤敦司, 内田淳一, 圓谷 浩, 加藤千昭, 黒田 均, 佐藤俊樹, 清水正文, 藤田 栄, 宮坂明博, 森本康秀, 山下正明: 鉄と鋼, 89 (2003), 3-17.
- 2) 宮下明博: 西山記念技術講座, Nos.186-187 (2005), 1-21.
- 3) 鈴木励一: 溶接技術, 54-9 (2006), 124-130.
- 4) 鈴木励一: 溶接技術, 54-10 (2006), 124-130.
- 5) 松井仁志: 溶接学会誌, 66 (1997), 423-427.
- 6) 大谷忠幸: 溶接学会論文集, 16 (1998), 453-461.
- 7) 松井仁志, 鈴木 弘, 山田幹雄: 溶接学会論文集, 15 (1997), 476-483.
- 8) 内原正人, 高橋通泰, 高 隆夫, 宮内秀樹, 中田実雄: 住友金属, 48-4 (1996), 147-151.
- 9) 松井仁志: 溶接学会全国大会講演概要, 57 (1995), 28-31.
- 10) 佐藤正晴, 今岡 進: 溶接学会全国大会講演概要, 55 (1994), 264-265.
- 11) 大谷忠幸, 中村泰三, 水橋伸雄, 斉藤 亨: 溶接学会全国大会講演概要, 52 (1993), 60-61.
- 12) 向井喜彦, 西村 新, 中島淳雄, 奥 清司: 溶接学会論文集, 7 (1989), 70-75.
- 13) 藍田 勲, 菅 哲男, 中野利彦: 溶接学会全国大会講演概要, 44 (1989), 216-217.
- 14) 安田功一, 中野昭三郎, 小松忠男, 中島 正: 溶接技術, 37-2 (1989), 94-98.
- 15) 安田功一, 中野昭三郎, 小松忠男, 中島 正: 溶接学会全国大会講演概要, 43 (1988), 164-165.
- 16) 江里口徹, 曾我 聡, 朝田 博, 井上正二: 日新製鋼技報, 72 (1995), 35-44.
- 17) 内原正人, 高 隆夫: 溶接学会全国大会講演概要, 55 (1994), 262-263.
- 18) 松井仁志, 山田幹雄: 溶接学会論文集, 15 (1997), 484-493.
- 19) 平井宏樹: 電気製鋼, 67 (1996), 221-227.
- 20) 木本 勇, 小山汎司, 鈴木友幸, 斉藤 亨, 松井仁志: 溶接学会全国大会講演概要, 58 (1996), 52-53.
- 21) 内原正人, 高 隆夫, 宮内秀樹, 宮崎久彦, 栗本 孝, 津村博康: 溶接学会全国大会講演概要, 52 (1993), 54-55.
- 22) 松井仁志, 鈴木 弘, 服部泰治, 塩野谷哲: TOYOTA Technical Review, 45-1 (1995), 116-125.
- 23) 永田 雅, 平井宏樹: 溶接学会全国大会講演概要, 53 (1993), 42-43.
- 24) 西口公之, 森山欽一, 関谷 卓: 溶接学会全国大会講演概要, 53 (1993), 44-45.
- 25) 松井仁志, 塩野谷哲: 溶接学会全国大会講演概要, 53 (1993), 38-39.
- 26) 内原正人, 高祖正志, 高 隆夫, 栗本 孝, 津村博康, 宮内秀樹, 宮崎久彦: 溶接学会全国大会講演概要, 51 (1992), 70-71.
- 27) 第3版鉄鋼便覧I, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1981), 39.