ス圧がかなり上昇しても溶融金属面がへこむことは無いが，図の場合は多量のブローホールが発生することから，界面張力によるへこみ抑制作用に対して，ガスの膨張作用の方が相当強かったものと思われる。

脱脂後の有機物の量は前に述べたように0.01 mg/cm^{2}以下であり，この量は亜鉛目付量4.5 mg/cm^{2}の約500分の1以下であることから，脱脂済み材の溶接部ブローホールの原因は亜鉛の蒸発による可能性が高い．また，入手のままの母材の有機物付着量は1 mg/cm^{2}程度であるが，ブローホールが殆ど発生しない普通鋼板に比べて多いことはなく，この程度であればブローホール形成の主要因にはなりにくいと考えられる．

4. 溶接部の分析

4.1 ブローホール内のガス分析

上記の方法で母材を2次真空脱脂まで行った直後に溶接し，発生したブローホールに含まれるガスについてマススペクトル分析を行った．ガスの採取方法としては，機械加工等による熱の影響や溶接金属中に含まれるガス成分の巻き込みを避けるため，真空容器中（10^{-10} MPa）で試料をブローホールのある位置で折り曲げ，この時放出されたガスをイオン化し，質量分析した．その結果がFig. 3である．バックグラウンドとの比較から，水素およびメタンを始めとする炭化水素が主であることが分かる．また水素はメタンの約10分の1であり，水素が気孔発生の原因である可能性は低いといえる．

4.2 ブローホール壁面の分析

Fig. 4はルート部とブローホールを含む面で，溶接ビード部を縦に引き裂いたときの破面を示す．試料は(a)のように板の重ね部を開いて引っ張って得た．矢印の方向から見た写真を(b)に，そのスケッチを(c)に示す．(c)からブローホ

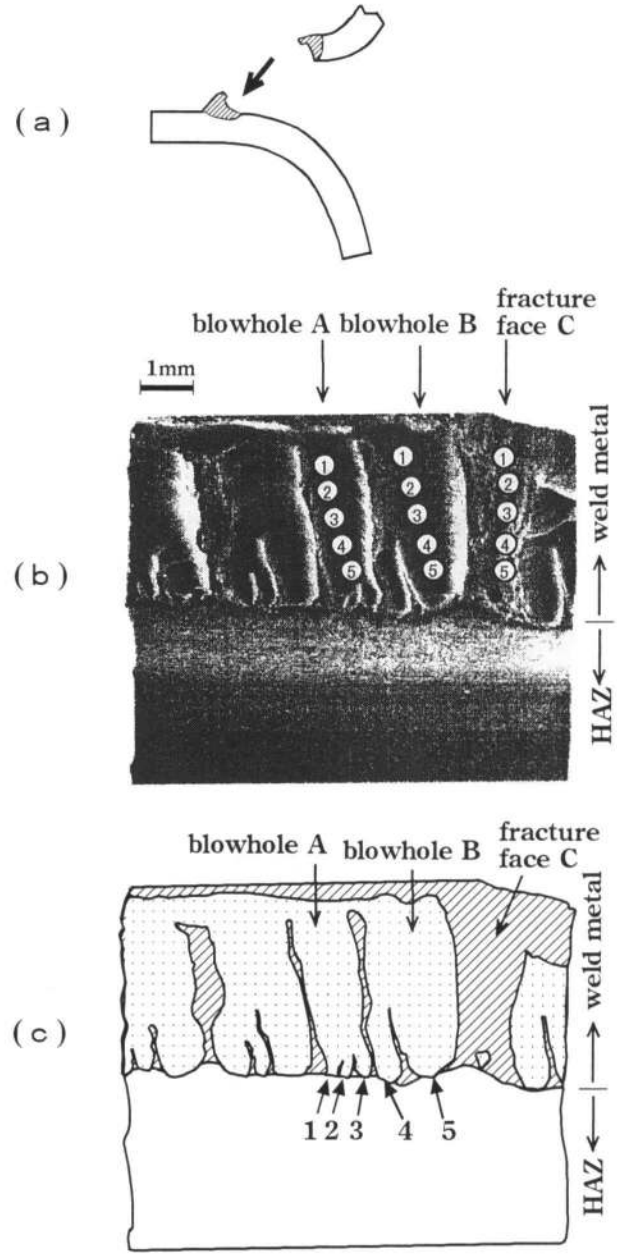


Fig. 4　Transverse fracture face of weld bead.

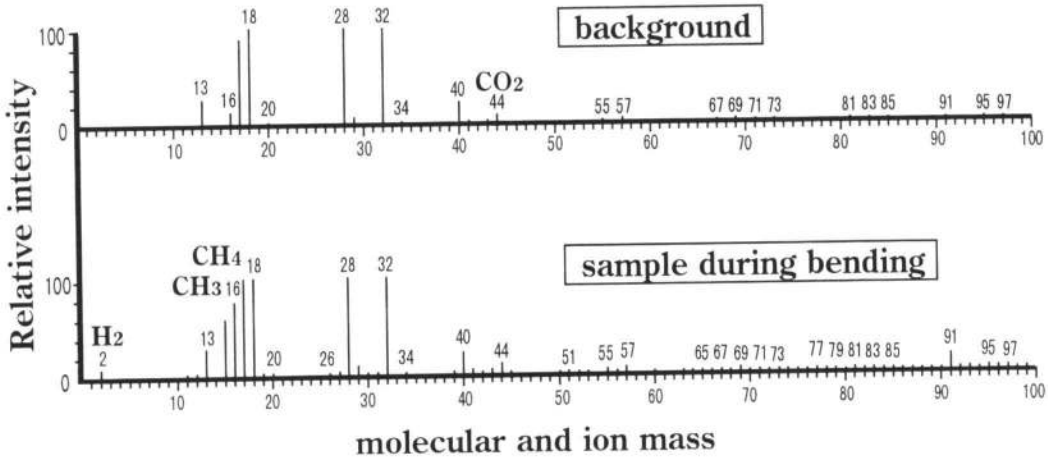


Fig. 3　Mass-spectrum of gas in the blowholes.

Table 2 Zinc distibution of blowhole wall faces and weld metal fracture face.

Point	blowhole A			blowhole B			fracture face C		
	Zn	Fe	O	Zn	Fe	O	Zn	Fe	O
①	17	86	1.3	15	86	1.0	–	99	–
②	24	76	1.4	22	77	1.2	–	99	–
③	66	35	0.9	66	35	1.0	–	97	–
④	69	32	0.9	68	33	0.9	–	97	–
⑤	69	32	1.6	65	34	2.2	–	98	–

(relative intensity of X-ray in EPMA)

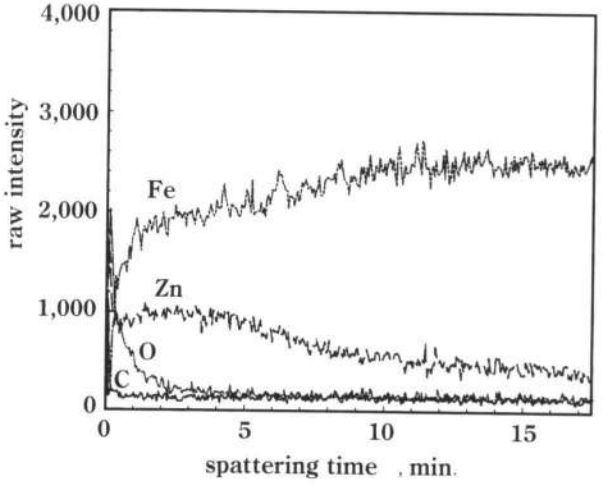


Fig. 5 Zinc distribution inside the blowhole wall face.

ールの基点1，2，3，4，5は溶接金属と熱影響部の境界，即ち板の合わせ部にあることがわかる．また，基点1，2，3から気泡がビード表面に向かって成長しながら合体してブローホールAが形成され，基点4，5からブローホールBが形成された様子が見られる．

(b)のブローホールAおよびBと破断面Cの壁面の1～5の各々5カ所についてEPMAで亜鉛，鉄，酸素の元素分析を行った．その結果がTable 2である．破断面Aではほぼ鉄のみが認められ，亜鉛等は認められなかった．一方，ブローホール壁面では鉄以外に亜鉛と若干の酸素が認められた．酸素が認められるのは，溶接中に気孔が外気に通じて酸化したためと思われる．亜鉛については，ブローホールの基点と見られる板合わせ部近傍から，ビード表面に向かって濃度が低下する傾向が見られた．さらにブローホールCの3の付近を，壁面から溶接金属内部に向かってAES分析を行った．その結果をFig. 5に示す．ブローホール壁面の最表面では亜鉛の酸化層が見られ，その内部では鉄と亜鉛の合金化層および拡散層が見られた．Table 2およびFig. 5の結果は，亜鉛がブローホールの形成に深く関わっていることを示している．すなわち，板合わせ部の基点から供給される亜鉛によって，ブローホールは次第に成長し，その過程で壁面で亜鉛が吸収され，時間の経過に伴って亜

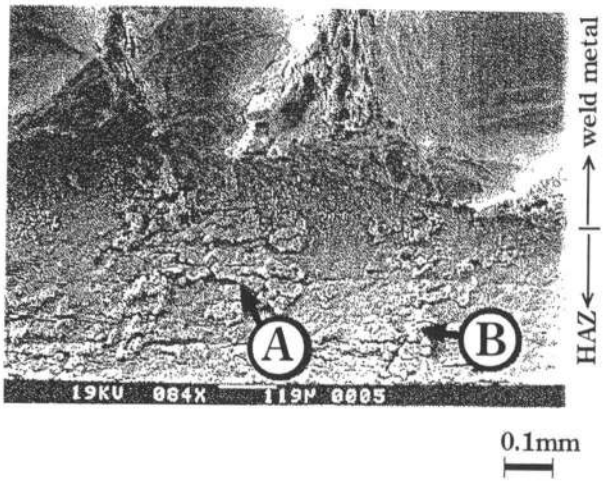


Fig. 6 Propellant fouling of zinc at HAZ.

鉛濃度が高まる一方，ビード表面に向かって成長する先端部では，気孔表面積の拡大によって拡散層が薄くなり，Table 2のような分布が生じたものと考えられる．

4.3 板合わせ部の熱影響領域の分析

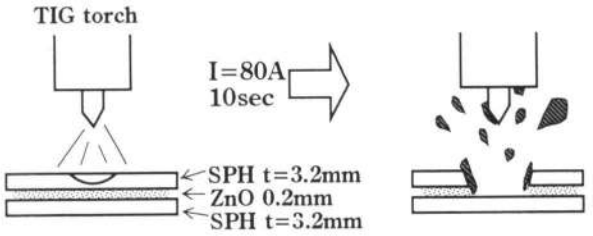
気孔を形成する亜鉛を供給していると思われる板合わせ部の熱影響領域について，EPMAによる面分析を行った．その結果，溶融境界から母材側へ200～300 μmの範囲には脱亜鉛領域が見られた．またその中でFig. 6に示すような，亜鉛を含む筋状の残さが認められ，その位置はブローホールの基点とほぼ一致していた．このことから，遠方から脱亜鉛領域を横切って供給される亜鉛が，筋状の経路を通り，ブローホール基点に供給されていたものと考えられる．

5. 亜鉛の気化抑制方法

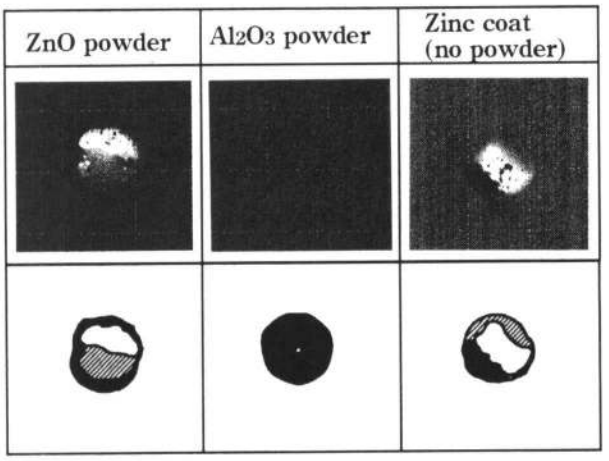
上記の分析結果から，気孔形成の主原因は気化した亜鉛と考えられるので，亜鉛の気化を抑制する方法について検討した．亜鉛の気化を抑制する手段としては，鉄の融点より高い沸点を有する亜鉛化合物を形成する，効果の優れた方法が報告されているが[7]，予め鋼板に塗布する工程が必要となるなど，量産施工法への適用に困難な面がある．亜鉛の化合物の中で，酸化亜鉛は鉄の融点よりはるかに高い昇華温度を持ち[10~13]，常圧下では1720℃で昇華し，加圧下では2000℃～2250℃の融点を持つ．そこで，比較的容易に実行可能な手段として，シールドガスに酸素を添加して，溶接中に亜鉛の酸化を促進する方法について検討した．

5.1 亜鉛酸化の効果

Fig. 7はMAG溶接において，シールドガスに酸素を添加した場合の，ブローホール発生量に与える影響を示している．ブローホールの計数は，0.5 mm以上の大きさのもの



(a) Explosion of zinc oxide



(b) X−ray photographs of molton pool

Fig. 10　Vaporization phenomina of zinc oxide adjacent to weld pool.

は板厚より薄いものの，溶融金属が残った部分である．めっき鋼板の場合と酸化亜鉛粉末の場合は，溶融金属の大部分が飛散しているのがわかる．なお，アルミナの場合には粉末間の空気によると思われる，極く僅かなブローホールが見られる．これらの結果から，酸化亜鉛の蒸気圧は鋼板の融点付近においては，かなり高い値を示すものと考えられる．

したがって前述の Fig. 8 において，酸素を過剰に添加した場合にブローホールが増加する理由は，以下のように想定される．すなわち，酸化によって一旦亜鉛の気化が抑制されるものの，やや遅れた時期に溶融池の極く近傍の酸化された亜鉛が気化し，このときのガスは既に溶融池に充分に覆われた状態になっているため，かなりの割合で溶融池に侵入するためと考えられる．

酸化亜鉛の気化が著しくなる温度よりも，溶融池の温度が低ければ，亜鉛の酸化促進によって，ブローホールの発生を防止することが可能となる．そこで低融点の各種溶加材を電極にするとともに，アルゴンに酸素を添加したシールドガスを用いて溶接し，ブローホール発生量によって，酸化亜鉛の気化温度の推定を試みた．溶接結果を Fig. 11 に示す．銅・ニッケル・チタン合金の融点はおよそ1350℃程度であるが，ブローホールはほとんど見られない．これに対して鉄・ニッケル合金の融点は1400～1450℃であり，

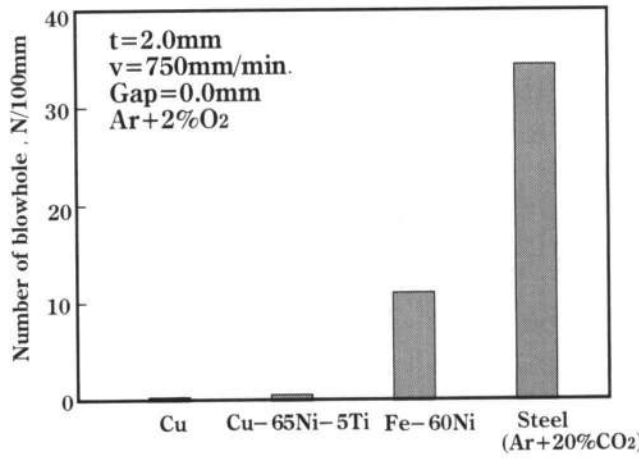


Fig. 11　Effect of welding wire on blowhole formation.

鋼の場合の3分の1程度の数のブローホールが発生している．このことからおよそ1400℃を越えると酸化亜鉛の気化が激しくなるものと考えられる．

6. 結　　言

合金化溶融亜鉛めっき鋼板の重ねすみ肉継手を，比較的高速で溶接した場合に発生するブローホールについて，その原因となる物質および形成の機構について検討し，亜鉛の気化抑制に対するシールドガス成分の影響を明らかにした．得られた結果を以下に述べる．

(1)　母材に付着している有機物が1 mg/cm^2 程度であれば，ブローホール形成の主要因とはならない．

(2)　有機物の量が亜鉛目付量の約500分の1以下となる充分な脱脂後でも，脱脂前の母材と同等の多数のブローホールが発生する．

(3)　ブローホール部を破断して採取されたガスは，水素およびメタンを始めとする炭化水素が主であり，水素はメタンの約10分の1である．

(4)　板合わせ部の熱影響部からルート部のブローホール基点に，亜鉛が供給される筋状の痕跡が確認され，その基点からビード表面へ向かって，ブローホール壁面において亜鉛の濃度傾斜が見られる．

(5)　(1)～(4)より，ブローホールの原因物質は水素である可能性は低く，亜鉛の蒸発によると考えられる．

(6)　酸素を添加したシールドガスは亜鉛の酸化を促進して気化を抑制し，ブローホールの減少に効果がある．その最適な添加比率は，80%Ar+20%CO_2 混合ガスに対して5%程度であり，継手間隙が0.2～0.4 mm の場合に特に効果的である．

(7)　溶融池温度が低くなるように，融点が約1400℃以下の溶加材を選択して，酸素添加ガスを用いると，ブローホール低減に効果的である．

本研究の遂行に当たり，試料の詳細な分析調査にご協力