

アルミニウム合金の MIG 溶接におけるアルゴンガスへの 窒素、酸素および水素添加の影響

寺 井 士 郎
杉 山 稔 彦
福 井 利 安

住友軽金属工業株式会社

アルミニウム合金の MIG 溶接におけるアルゴンガス への窒素、酸素および水素添加の影響*

寺 井 士 郎** 杉 山 祐 彦*** 福 井 利 安***

Effects of Nitrogen, Oxygen and Hydrogen Gases Added to Argon Gas on MIG-Welding of Aluminum Alloys

by Shiro Terai, Yoshihiko Sugiyama and Toshiyasu Fukui

Studies were made on the effects of nitrogen, oxygen and hydrogen gases added to argon gas on the weldability and properties of MIG welds in aluminum alloys.

Tests were carried out to observe appearance, shape and depth of penetration, mechanical properties, porosities, structures and other properties of welds.

The results obtained were summarized as follows;

(1) The addition of nitrogen was considered to be effective in practical application for increasing the depth of penetration, tensile strength, and refining of the structure in welds.

In commercially pure aluminum, it decreased the porosities of welds with no formation of scale on bead surface; while, in Al-Mg alloys, it formed the brown scale on bead surface and the porosities were not always decreased.

(2) The addition of oxygen was considered to be advantageous in practical application, because it increased the depth of penetration and decreased the porosities of welds. However, its addition of above 5% was harmful owing to the puckering and formation of excessive oxide film (white scale) on the bead surface.

(3) The addition of hydrogen was harmful, because it remarkably increased the porosities resulting in decreasing of the mechanical properties of welds.

1. 緒 言

近年溶接構造物にアルミニウム合金を用いることが多くなってきたが、実際の溶接施工においては、溶接欠陥の防止、作業性の向上、溶接コストの切下げなど工業的な観点よりも多くの問題点を残している。

従来よりアルミニウム合金の溶接には、TIG溶接やMIG溶接が多く用いられ、とくに大型の構造物では溶接性および作業性の点よりMIG溶接が主として用いられている。わが国では、これらの溶接時のシールドガスとして高純のアルゴンガスが用いられ、酸素、窒素、水素あるいは水分などは不純物としてその許可量がJIS K1105に定められている¹⁾。これらの不純物としての酸素、窒素、水素あるいは水分の影響についてはすでに種々検討されており^{2,3)}、これらのガスの含有は溶接部の性能を劣化させるとしている。

しかしながら最近アルゴンガスにかなりの量の窒素、酸素あるいは炭酸ガスを混入することにより溶接部の気孔が著しく防止されるとの報告^{4~6)}も見られ、これらの点についてはさらに検討する必要があるようと思われる。

筆者らはアルミニウムおよびその合金のMIG溶接におけるアルゴンガスに窒素、酸素を混入し、溶接部の諸性能を改良する目的で実験を行なったが、参考のために水素を混入した場合についても実験したので、これらを合わせて報告する。

2. 供試材および実験方法

2・1 供 試 材

供試材は母材として1100アルミニウム、5052、5083合金およびAl-Zn-Mg系合金の8,9および10mm板、溶加材(電極線)として1100、5356、5183およびAl-Zn-Mg(Zr)合金の1.6mmφをそれぞれ用いた。これらの化学組成をTable 1に示す。なお各試験片の水素量もTable 1に参考までに示した。

2・2 シールドガス

シールドガスは100%Ar, Ar+1, 2.5, 5, 10, 20%N₂, Ar+0.5, 1, 2, 10%O₂およびAr+0.25, 0.5, 1, 2%H₂である。これらの混合ガスに使用した各種ガスの純度はTable 2に示す。

2・3 実験方法

実験はMIG溶接部のビード外観、ビード形状および溶込み、溶接部の機械的性質、気孔、組織などにおよぼす混合ガスの影響について行なったが、主として1100および50

* 軽金属 : 18(1968), 609~616 に発表

** 研究部、工学博士

*** 研究部

Table 1 Chemical compositions and hydrogen contents of specimens.

Specimens		Chemical compositions (%)									H_2 contents mℓ NTP/100g
		Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Zn	Mg	Ti	Zr	
Parent metals	1100	0.04	0.33	0.14	0.01	<0.01	0.03	0.01	<0.01	—	0.96
	5052	0.02	0.27	0.10	<0.01	0.20	0.02	2.46	<0.01	—	0.26
	5083	0.01	0.22	0.09	0.65	0.16	0.01	4.44	<0.01	—	0.80
	Al-Zn-Mg	0.04	0.17	0.05	0.27	<0.01	3.84	2.04	0.01	0.20	0.33
Filler metals	1100	0.04	0.32	0.12	<0.01	<0.01	0.02	0.01	<0.01	—	2.88
	5183	0.01	0.22	0.08	0.66	0.18	0.02	4.31	<0.01	—	1.39
	5356	0.01	0.24	0.10	0.12	0.09	0.01	5.19	0.10	—	0.61
	Al-Zn-Mg	0.02	0.17	0.06	0.29	<0.01	3.78	2.16	0.01	0.23	0.76

83合金について試験し、5052およびAl-Zn-Mg系合金については参考程度に検討したに過ぎない。なお1100アルミニウムは1100-1.6mmφ, 5083合金は5356, 5183-1.6mmφの溶加材でそれぞれ溶接した。

Table 2 Purities of shielding gases used.

Gases	Purities	Impurities	Dew-Point
Ar	>99.99%	—	—
N ₂	>99.98%	<0.02%O ₂	-55°C
O ₂	>99.5%	—	—
H ₂	>99.7%	<0.3%O ₂	—

3. 実験結果

3.1 ビード外観

1100および5083合金(10mm)をそれぞれ1100および5183(1.6mmφ)溶加材を用いて250A(24V), 280A(24V)および300A(24V)でMIG全自動溶接し、ビード外観を比較した。

この一例をPhoto. 1に示す。Photo. 1は5083合金を5183溶加材で、280A, 24V, 60cm/minで溶接したものである。100% Arで溶接せるものは熱影響部にじやっかんスパッタの付着が見られるが、ビードに金属光沢があり、

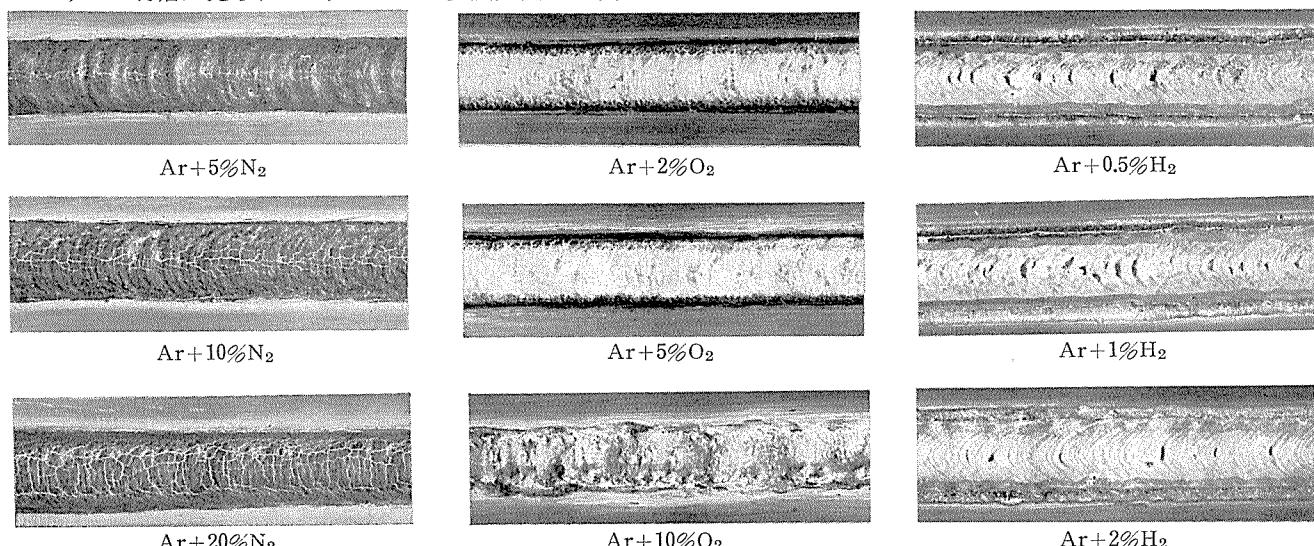


Photo. 1 Effect of gas compositions on appearance of MIG-welds in 5083 alloy at constant welding condition.
(280A, 24V, 60cm/min, 28l/min)

非常に良好な外観を示している。Ar+N₂ガスで溶接したものはビード表面にMgの塗化物と思われる褐色のスケールの付着が見られる。このスケールは窒素量が増せば著しく、また高電流域で著しい。Ar+O₂で溶接せるものはビード表面に酸化物と思われる白色のスケールの付着が見られる。形状的な面より外観の判定をすると、低電流域では比較的良好な形状を示しているが、酸素量の多いものは高電流域でパックリングやアンダーカットを生じており好ましいものではない。Ar+H₂で溶接せるものはビード表面に金属光沢があり、また形状的にも良好であるが、表面に気孔が開口しており外観を悪くしている。

Table 3に1100および5083合金をそれぞれ1100および5183溶加材で溶接せるものの外観の概略的な判定を示す。Table 3より明らかにごとく、5083合金にくらべて1100アルミニウムの方が全般的に良好な外観を示している。特にAr+N₂で溶接せる場合、5083合金ではビード表面に褐色

のスケールの生成が見られたが、1100アルミニウムではこれらのスケールはほとんど生成されていない。また $\text{Ar} + \text{O}_2$ で溶接せる場合も 1100 アルミニウムの方が白色のスケールの生成量がじゃっかん少ない。

Table 3 Effects of gas compositions on appearance of MIG-welds in aluminum alloys.

Shielding gases		Materials	
		1100	5083
Ar		○	○
$\text{Ar} + \text{N}_2$	5%	○	○
	10%	○	○
	20%	○	●
$\text{Ar} + \text{O}_2$	2%	○	○
	5%	○	○
	10%	●	●
$\text{Ar} + \text{H}_2$	0.5%	○	○
	1%	○	○
	2%	○	○

○ Good ○ Fair ○ Poor ● Very poor

3・2 ビード形状および溶込み

5083合金(10mm)を5183および5356(1.6mmφ)溶加材でMIG全自動溶接を行ないおのののビード形状および溶込みを調査した。

Photo. 2はBead-on-plate welds(ビード置き), Butt-joints(突合せ溶接)およびFillet welds(スミ肉溶接)の断面マクロ組織を示す。Bead-on-plate weldsはいず

れも 300A, 24V, 60cm/min で溶接したものであるが, Photo. 2より明らかに Ar+10%N₂ では溶込み先端はフィンガー状でかつ溶込みはかなり浅い。これに比べて Ar+N₂ および Ar+O₂ ガスでは溶込みも深くかつ先端は丸みを帯びている。Ar+H₂ ではこれらの中間の様相を示しているが、余盛がかなり高い点が異なっている。

Butt-joints は 100%Ar の場合のみ溶込み不足を防ぐ意味で 320A, 24V, 60cm/min で溶接し、他の Ar+N₂, Ar+O₂ および Ar+H₂ の場合は 300A, 24V, 60cm/min で溶接した。100%Ar では溶込みが浅いため(写真には示していないが) 300A では著しい溶込み不足が見られた。

Fillet welds についてはいずれも 340A, 24V, 60cm/min で溶接した。Ar+N₂ および Ar+O₂ ガスでは溶込みも十分でかなり良好な継手を示しているが、100%Ar では溶込みが浅く必ずしも十分とはいえない。

Fig. 1 および Fig. 2 に 5083 合金を 5183 溶加材で溶接したものにつき、ビード幅、溶込み深さおよび余盛高さを測定した結果を示す。Fig. 1 は 100%Ar, Ar+5%N₂, Ar+2%O₂ および Ar+1%H₂ で溶接電流を 250A～330A (アーチ電圧: 24V, 溶接速度: 60cm/min) に変化させた結果であり、Fig. 2 は溶接条件を一定 (溶接電流: 300A, アーチ電圧: 24V, 溶接速度: 60cm/min) にしてシールドガス中の窒素、酸素および水素量を変化させた結果である。Fig. 1 および Fig. 2 より明らかに Ar+N₂ ガスではビード幅、溶込みとも大きく、Ar+O₂ ガスでは溶込みは著しく増すがビード幅は小さくなっている。Ar+H₂ ガスではビード幅、溶込みともにじゃっかん増すが、特に余盛高さが大きくなっている。

これらのビード幅、溶込み深さおよび余盛高さは Fig. 2 に示すとく窒素、酸素および水素の混入量により著しく異なるので Ar+N₂, Ar+O₂ および Ar+H₂ ガス間の直接の比較はできないが、100%Ar と比べた場合については明確な相違が認められている。

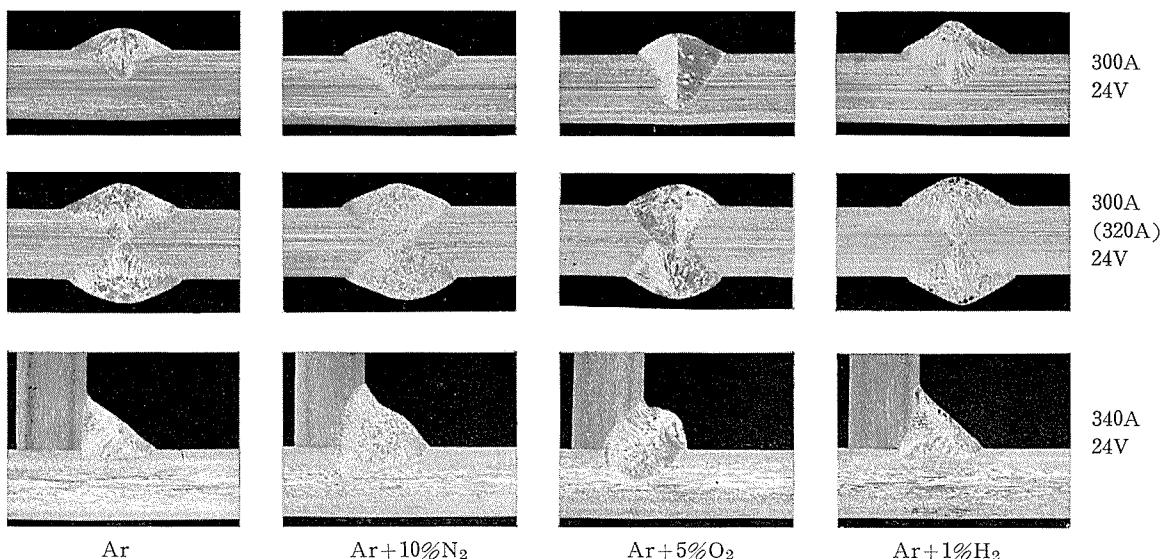


Photo. 2 Effect of gas compositions on shape and penetration of MIG-welds in Al-Mg alloy. (Plate thickness: 10 mm)

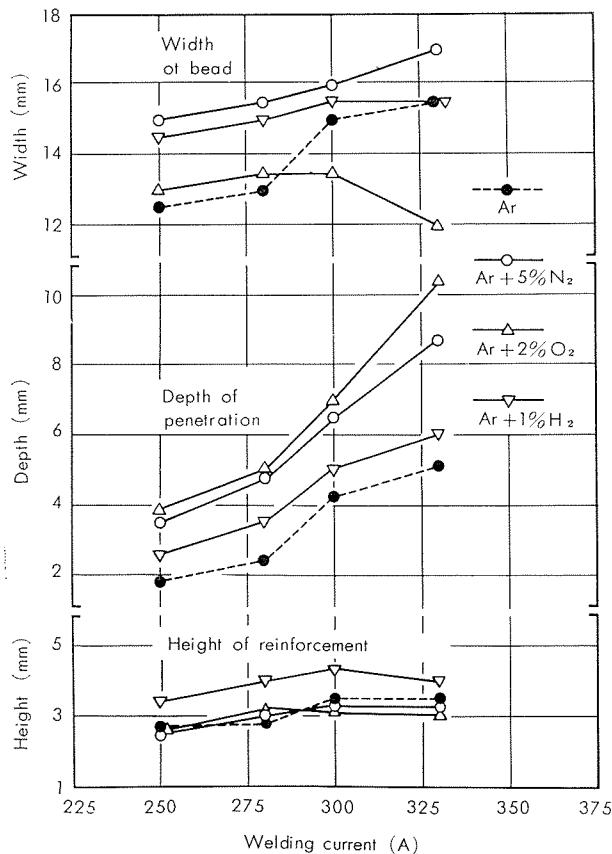


Fig. 1 Effects of gas compositions and welding currents on shape and penetration of MIG-weld in 5083 alloy.

3・3 機械的性質

1100および5083合金の8, 9mm板を1100および5183溶加材でMIG全自動溶接を行ない溶接部の引張性質を調査した。

Fig. 3およびFig. 4にそれぞれ1100および5083合金のJIS-5号試験片(余盛削除)による引張試験の結果を示す。1100アルミニウムの場合Ar+N₂ガスでは引張強さがごくわずか向上する傾向が見られ、Ar+O₂ガスではほとんど変化なく、Ar+H₂ガスでは引張強さおよび伸びとともに著しく低下している。5083合金の場合もほぼ同様で、Ar+N₂ガスではじゅうかん引張強さが向上する傾向にあり、Ar+O₂ガスではほとんど変化なく、Ar+H₂ガスでは著しく低下している。以上はJIS-5号試験片による結果であるが、JIS-1号試験片(Reduced section)についても、ほぼ同じような結果がえられた。すなわち、1100および5083合金ともAr+N₂ガスではじゅうかん強さが向上し、Ar+O₂ガスではほとんど変化なく、Ar+H₂ガスでは著しい強度低下が見られた。

3・4 気孔

1100, 5052, 5083およびAl-Zn-Mg合金の8, 9および10mm板を1100, 5356, 5183およびAl-Zn-Mg溶加材でMIG全自動および半自動溶接しX線透過試験を行なって気孔発生におよぼす窒素、酸素および水素添加の影響について調査した。

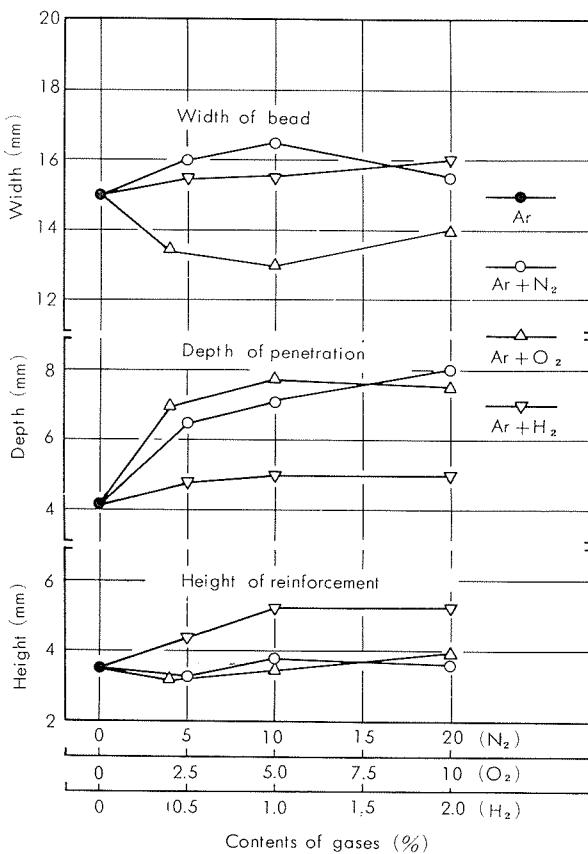


Fig. 2 Effects of gas compositions on shape and penetration of MIG-welds in 5083 alloy at a constant welding current (300 A).

気孔率はX線透過フィルムに見られる気孔の径を測定し各気孔の体積と気孔数を測定して、これらより気孔率を求めた。気孔の径はTable 4に示すように分類した。気孔の体積率は単位長(100mm)当たりについて求め単位は便宜上mm³/100mmで示した。{気孔のX線像はX線の撮影条件あるいは試料の板厚で変るが、本実験では比較的同様な板厚の試料を同様なX線条件で検討しているので検出される気孔もほぼ同じと考えてよい。そこで便宜上、気孔率はビードの単位長(100mm)において検出された気孔の総体積で示した。}

一、二の代表的な例として1100および5083合金の気孔発生におよぼす窒素、酸素および水素添加の影響をFig. 5およびFig. 6に示す。Fig. 5は1100-10mm板を1100-1.6mmφ溶加材でMIG半自動溶接(2層溶接)した結果である。Fig. 5より明らかなるごとく、Ar+N₂およびAr+O₂ガスでは気孔の発生はかなり減少しており、特にAr+O₂ガスの場合にこの効果が著しい。Ar+H₂ガスでは著しく強度低下が見られた。

Table 4 Dia. and volume of pores.

Dia. of pores	Average dia. of pores	Volume of a pore in average size
0.2~0.6mm	0.4mm	0.033mm ³
0.6~1.0mm	0.8mm	0.268mm ³
1.0~1.4mm	1.2mm	0.904mm ³
>1.4mm	—	—

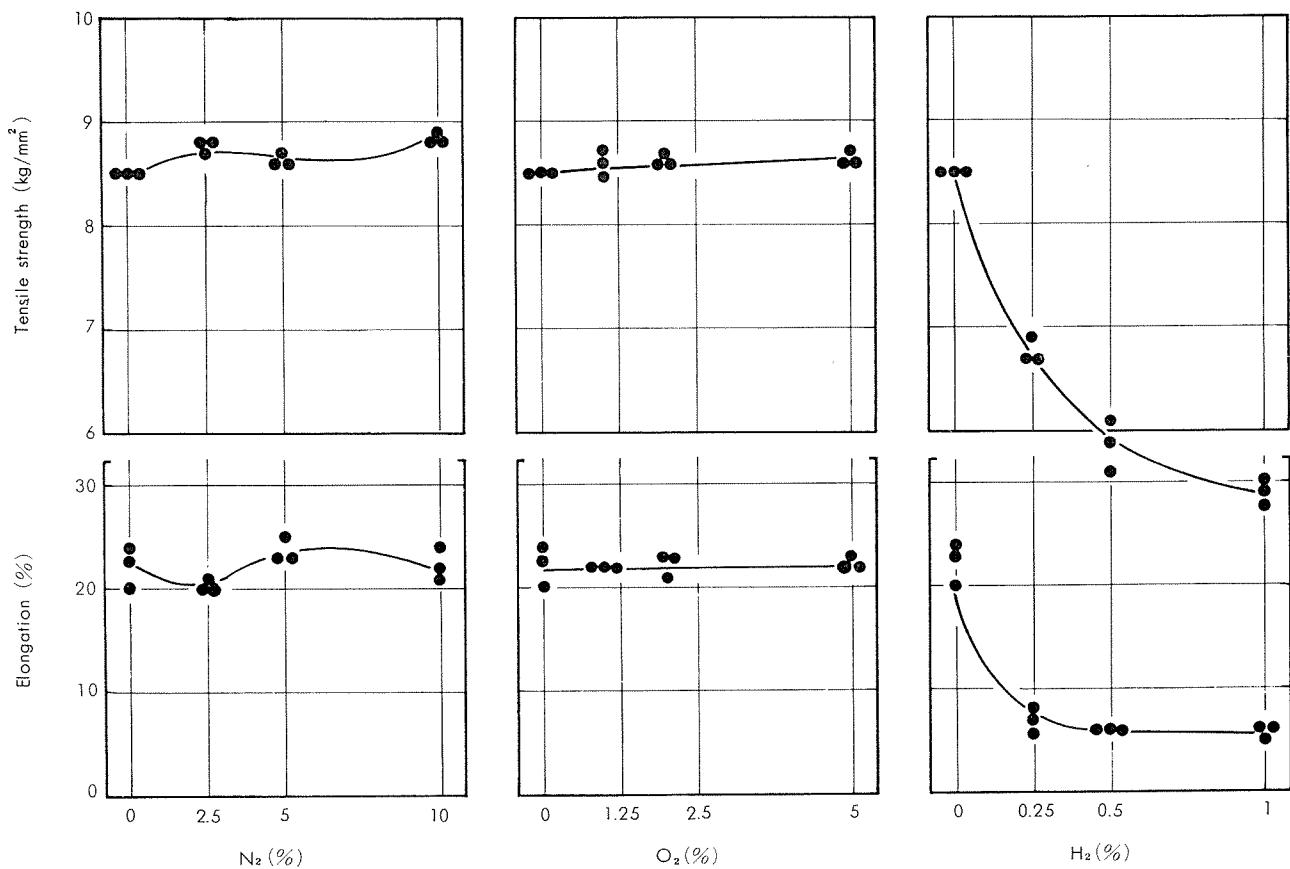


Fig. 3 Effects of gas compositions on tensile properties of MIG-welds in 1100 aluminum.

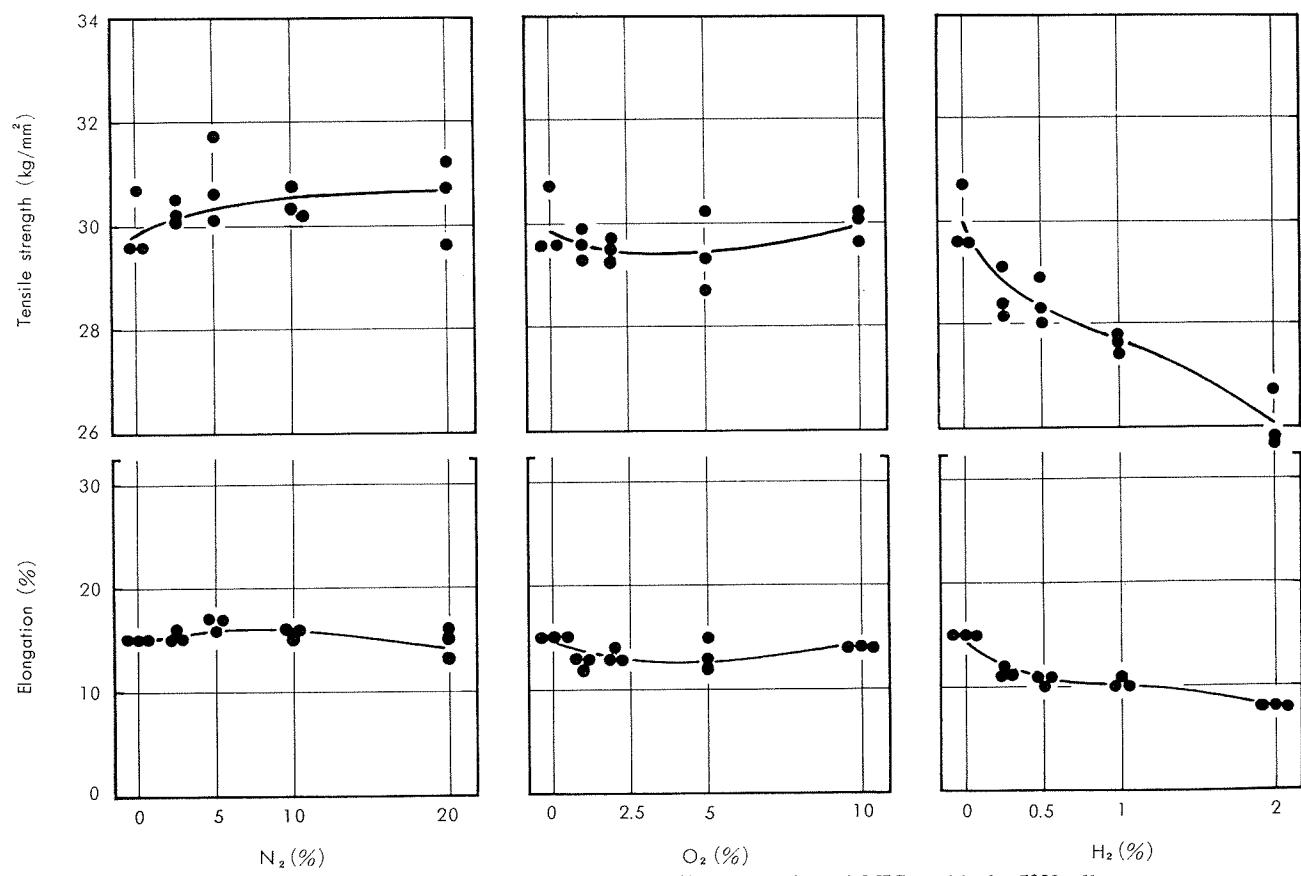


Fig. 4 Effects of gas compositions on tensile properties of MIG-welds in 5083 alloy.

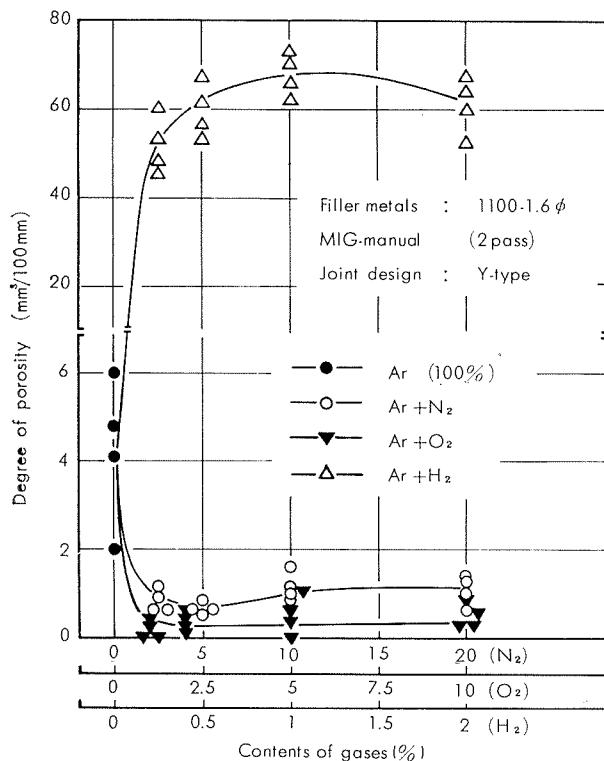


Fig. 5 Effects of gas composition on porosity rating of MIG-welds in 1100 aluminum.

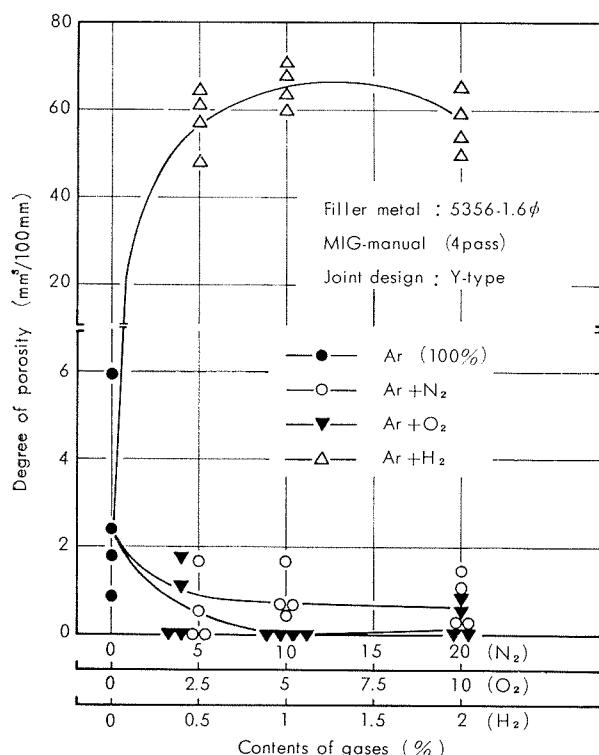


Fig. 6 Effects of gas compositions on porosity rating of MIG-welds in 5083 alloy.

い気孔の発生が見られる。Fig. 6 は5083-10mm板を5356-1.6mmφ溶加材でMIG半自動溶接(4層溶接)した結果である。Ar+N₂ガスでは、わずかながら気孔は減少する傾向が見られる。Ar+O₂ガスでは気孔の減少は著しく非常に効果的である。Ar+H₂ガスではFig. 5と同様、気孔の著しい発生が見られる。

この他1100および5083合金を用いてMIG全自動によるBead-on-plate溶接およびMIG全自動ならびに半自動による突合せ溶接を種々行なった。これらの結果を総括してTable 5に示す。Table 5より明らかなるとく1100アルミニウムではAr+N₂およびAr+O₂ガスで気孔はともに減少しているが、5083合金の場合Ar+N₂ガスで減少する場合と逆に増加する場合の両方があり、特に窒素の効果を明確にすることはできない。Ar+O₂ガスでは5083合金の場合も気孔は著しく減少しており酸素添加の顕著な効果が認められる。Ar+H₂ガスではいずれの場合も気孔の発生が著しい。

Table 5 Effects of gas compositions on porosity rating of MIG-welds in aluminum alloys.

Welding Procedures	Pass	1100				5083			
		Ar	Ar+N ₂	Ar+O ₂	Ar+H ₂	Ar	Ar+N ₂	Ar+O ₂	Ar+H ₂
Bead-on-plate (machine)	1	○	○	○	○	●	○	○	●
MIG-machine	2	○	○	○	○	●	○	○	●
Butt joints	MIG-manual	2	○	○	○	●	○	○	●
MIG-manual	3	○	○	○	○	●	○	○	●
MIG-manual	4	○	○	○	○	●	○	○	●

○ Very good ○ Good ○ Fair ○ Poor ● Very poor

さらに5052およびAl-Zn-Mg系合金についても同様に実験したが、比較的5083合金と同じような傾向を示した。すなわちAr+O₂ガスでは気孔の発生は非常に少なく、Ar+N₂ガスでは減少するものと増加するものの両方が認められた。ただし、この増加する場合もその程度は非常に小さい。

3・5 組織

1100および5083合金をそれぞれ1100および5356(5183)溶加材で溶接せるもののマクロ組織およびミクロ組織を調査した。

Photo. 3に5083合金を5356溶加材で溶接せるものの断面マクロ組織を示す。Photo. 3より明らかなるとくAr+10%N₂ガスで溶接せるもののみ溶接部は著しく微細化されている。Ar+5%O₂およびAr+1%H₂ガスでは100%Arとほぼ同様で微細化は見られない。

このようなAr+N₂ガスで溶接した際の微細化は5356溶加材(0.1%Tiを含有)の時に特に著しいが、5183溶加材(Tiは含有されていない)の時にもじやっかん微細化しており、また1100アルミニウムを1100溶加材で溶接せる時にも同様な現象が認められている。

Photo. 4 に1100アルミニウムを1100溶加材で溶接したもののミクロ組織を示すが、Ar+5%N₂ガスで溶接せるもののみミクロ的にもかなり微細化している。100% Ar, Ar+2%O₂およびAr+0.5%H₂ガスではこの現象は認められない。なおAr+5%N₂ガスの試料には無秩序に分布した微細な化合物が形成されており、Ar+0.5%H₂には著しい気孔が認められる。

このPhoto. 4に認められた化合物を拡大してPhoto. 5に示す。これらの化合物はAr+N₂ガスで溶接した際にのみ認められ、無秩序ではあるが、やや群状をなしており、溶接金属のほぼ全面に分布している。また巨大な針状の化合物が認められることもある。これらの化合物を確認するためX線マイクロアナライザで測定したが、窒素と酸素が同時に検出された。

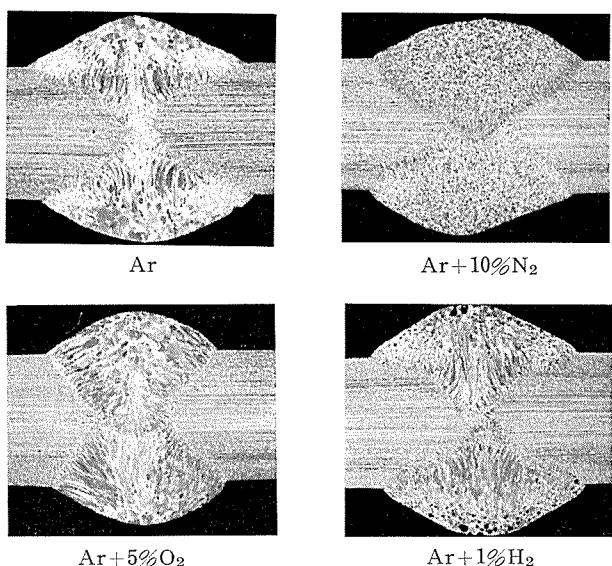


Photo. 3 Effect of gas compositions on refinement of structure in MIG-welds made with 5356 filler metal. (Parent metal : 5083-10mm).

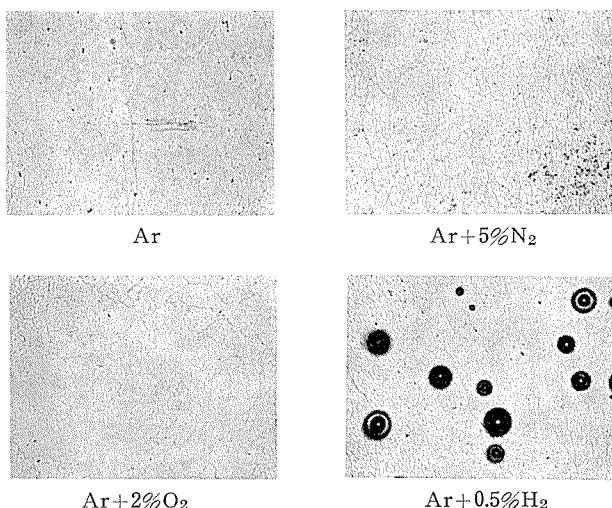


Photo. 4 Micro-structures of MIG-welds in 1100 aluminium. ($\times 100 \times \frac{1}{2}$)

4. 考 察

アルミニウム合金のMIG溶接におけるアルゴンガスへの窒素、酸素および水素添加の影響について実験した結果を概略的にまとめるとTable 6のごとくになる。以下これについてじやっかんの考察を加える。

Table 6 Summary of the results obtained.

Several properties of welds	Ar	Shielding gases									
		Ar + N ₂			Ar + O ₂			Ar + H ₂			
		5%	10%	20%	2%	5%	10%	0.5%	1%	.2%	
Appearance	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Penetration	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
Tensile strength	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	
Porosity	●	○	○	○	○	○	○	●	●	●	
Grain size	●	○	○	○	●	●	●	●	●	●	

○ Very good ○ Good ○ Fair ○ Poor ○ Very poor

4・1 外観および溶込み形状について

Ar+N₂ガスではビード表面に窒化物と思われる褐色のスケール、Ar+O₂ガスでは酸化物と思われる白色のスケールが形成される。特にAl-Mg系合金の場合にはこれらのスケールの形成量が多い。これらはある程度外観を劣化させており、混合ガスによる溶接法を実用化する上で最大の障害になると思われ、この点はMgとN₂の exothermic reactionとの関連でさらに検討する必要がある。

筆者の一人は、Ar+HeガスにN₂ガスを添加せる場合について種々検討しているが、Ar+N₂ガスで認められたようなスケールの形成は比較的少なく、良好な結果を得ている⁷⁾。また冀谷ら⁸⁾も同様な報告をしている。

ところでAr+N₂あるいはAr+O₂ガスでは溶込みは著しく増し、かつ先端部のフィンガー状が消滅して丸みを帯びているが、この点は厚板あるいは大型の構造物の溶接に非常に有利である。このAr+N₂およびAr+O₂ガスで溶込みが著しく増大する点はR.A. Cresswell³⁾や栗原⁹⁾によっても報告されており、またJ.G. Young¹⁰⁾やK.J. Clews¹¹⁾は銅について窒素添加の同様な効果を報告している。

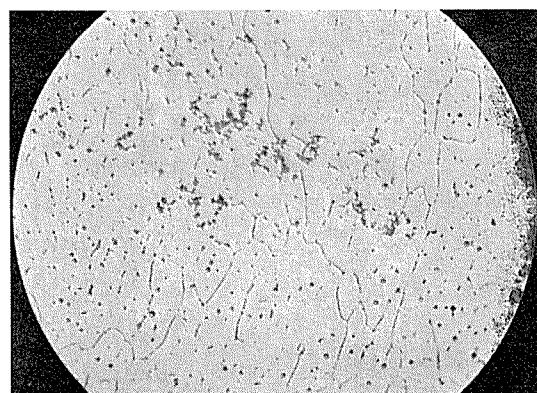


Photo. 5 Micro-structure of MIG-welds shielded with Ar+5%N₂ gas in 1100 aluminium. ($\times 400$)

窒素あるいは酸素の混入で溶込みが増す理由としては、酸化物あるいは窒化物の生成による反応熱を考えるのが妥当である。一例としておののの自由エネルギーを示すと 1000°C における AlN のそれは -40kcal/mol , $2/3\text{Al}_2\text{O}_3$ のそれは -200kcal/mol である。その他、窒素や酸素などの二原子分子は高温のアーケー中で熱解離し、これが溶接部で再び分子化する際に熱を放出するため、より高温となる点を指摘しているものもあるが、これは平衡反応であるので論拠としてはいくらか疑問がある。

4.2 機械的性質および組織について

$\text{Ar}+\text{N}_2$ ガスでは溶接部の引張性質はじゃっかん向上し、 $\text{Ar}+\text{O}_2$ ガスではほとんど変化せず、 $\text{Ar}+\text{H}_2$ ガスでは著しく劣下している。

$\text{Ar}+\text{N}_2$ ガスによる引張性質の向上の原因は組織の微細化と化合物（多分 AlN であろう）の形成によると考えられる。窒素の添加による結晶粒の微細化については萬谷ら¹²⁾の報告があるが、萬谷らは Ti や Zr が存在する時にのみ窒素の効果が認められるとして TiN および ZrN の核作用を指摘している。しかしながら本実験では Ti や Zr が存在しない時 ($<0.01\%$) でも、少し微細化しているものがある。したがってこの点については微細化の機構とも考え合せてさらに検討する必要があろう。

一方化合物の形成については、当初窒化物の形成と考えられたが、X線マイクロアナライザーでの検討で窒素のみならず酸素も同時に検出され⁷⁾、この点は、更に検討する必要があるように思われる。

$\text{Ar}+\text{N}_2$ ガスによる機械的性質の向上については益本ら⁵⁾あるいは G. Allen¹³⁾も指摘しているが、その理由の詳細については明らかにしていない。

なお、溶接部に分布している化合物が耐食性やその他の諸性質におよぼす影響については不明な点が多い。G. Allen¹³⁾は窒素の添加で耐食性は変化しないと報告しているが、さらに詳細な実験が必要である。また $\text{Ar}+\text{N}_2$ ガスでは溶接割れが減少するとの報告⁸⁾もあるが、溶接割れの防止は工業的に非常に重要な問題であるので、この点もさらに検討する必要があろう。

4.3 気孔について

$\text{Ar}+\text{N}_2$ および $\text{Ar}+\text{O}_2$ ガスで気孔の発生が防止される点は実用的に非常に有益である。

小林ら⁴⁾は $\text{Ar}+\text{N}_2$, $\text{Ar}+\text{O}_2$ および $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ガスにより気孔の発生はかなり防止されるとしており、益本ら⁵⁾も $\text{Ar}+\text{N}_2$ ガスで同様な報告をしている。しかしいずれも純アルミニウムで実験された結果であり合金系については報告されていない。

本実験においては純アルミニウム(1100)では $\text{Ar}+\text{N}_2$ および $\text{Ar}+\text{O}_2$ ガスで気孔の発生はかなり防止されているが、Al-Mg系(5052, 5083)およびAl-Zn-Mg系合金では $\text{Ar}+\text{N}_2$ ガスの場合必ずしも気孔が減少しているとは限らない結果となっている。これは Mg と N₂ の exothermic

reaction¹³⁾ によるためと思われるが、この詳細な機構については不明である。したがって実用的には合金系についてさらに検討する必要があろう。

この他アルミニウム合金の気孔の防止については TIG 溶接で $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ガスの使用が有効であるという報告⁶⁾や $\text{Ar}+\text{Cl}_2$ ガス¹⁴⁾ が有効であるとの報告もある。 $\text{Ar}+\text{Cl}_2$ ガスの場合にはその有毒性の点で実用的にも問題がある。 $\text{Ar}+\text{CO}_2$ ガスの場合には溶込みの増大、溶接コストの切下げなども関連してかなり有望であるように思われるが、著者らが別に行なった実験では、⁷⁾ 外観が優れず、実用的には、まだ多くの問題が残されているように思われる。

なお $\text{Ar}+\text{H}_2$ ガスでは気孔の著しい発生が見られたが、アルミニウム合金の場合水素が気孔の原因であることはかなり明確にされており、これについては特に問題はない。

5. 総括

アルミニウムおよびその合金の MIG 溶接におけるアルゴンガスへの窒素、酸素および水素添加の影響について調査した結果、つぎの点が明らかとなった。

- 1) 窒素の添加は溶込みを著しく増し、かつ機械的性質をじゃっかん向上させる。また結晶粒の微細化にも非常に有効である。

純アルミニウムではスケールの生成もなく、また気孔の防止にも有効であるが、Al-Mg 系合金では褐色のスケールが生成し、また気孔の防止にも特に有効であるとはいえない。しかし 10% N₂ 以下ではこの程度も軽微で実用的にも十分耐えうると思われる。

- 2) 酸素の添加は溶込みを著しく増しつつ気孔の防止に非常に有効である。しかしながら 5% O₂ 以上では外観上好ましくない。1~5% O₂ ではスケールの形成およびパッカリングも少なく、実用的にも有効である。
- 3) 水素の添加は溶込みをわずか増大させるが、気孔の発生が著しく、機械的性質をかなり劣化させている。

文 献

- 1) JIS K 1105(1961)
- 2) E. A. Taylor : Metallurgical Reviews, 12(1967), 116
- 3) R. A. Cresswell : British Weld. J., 4(1957), 4
- 4) 小林卓郎、桑名武、古平恒夫：溶接学会誌, 36(1967), 3 (講演概要)
- 5) 益本功、篠田剛：溶接学会誌, 36(1967), 2 (講演概要)
- 6) Jen Chia-lieh, Lo Chin-ch'ang and Chen Wu-chu : IIW Document No. XII-325-66, IX-508-66
- 7) 福井利安、難波圭三：未発表
- 8) 萬谷泰一郎、野谷秀雄：軽金属, 18(1968), 12
- 9) 栗原幸雄：軽金属溶接, 68(1968), 8
- 10) J. G. Young : British Weld. J., 8(1961), 7
- 11) K. J. Clews : British Weld. J., 8(1961), 7
- 12) 萬谷泰一郎、野谷秀雄：軽金属, 18(1968), 5
- 13) G. Allen : Weld. J., 38(1959), 3
- 14) M. B. Kasen and A. R. Pflueger : Weld. J., 37(1958), 6

アルミニウム合金溶接部の腐食に関する研究

寺 井 士 郎
杉 山 穎 彦
萩 原 理 樹
福 井 利 安

住友軽金属工業株式会社

アルミニウム合金溶接部の腐食に関する研究

寺井 士郎* 杉山 祐彦** 萩原 理樹** 福井 利安**

Studies on Corrosion of Aluminium Alloy Welds

by Shiro Terai, Yoshihiko Sugiyama, Michiki Hagiwara
and Toshiyasu Fukui

The corrosion tests of TIG-welds in 1080, 5052, 5083-O, H plates, 6061 and Al-Zn-Mg-T4, T6 plates were made for a period of one year in industrial and marine atmospheres and in industrial and sea waters.

The results obtained were summarized as follows:

- (1) Many small pits were produced on the whole surface of all specimens corroded in industrial and marine atmospheres. There were no differences to be observed among the all kinds of materials.
- (2) In industrial and sea waters, 1080, 5052 and 5083 alloy welds had high corrosion resistivity, while 6061 and Al-Zn-Mg alloy welds were severely corroded in their heat-affected zones.
- (3) The losses in tensile strength and elongation of welds by corrosion were negligibly small, except the Al-Zn-Mg alloys corroded in industrial water.
- (4) In industrial water, the solid solution zone of welded joints in Al-Zn-Mg-T6 specimens and all parts of T4 specimens, except for weld metal, were severely corroded.
- (5) Intergranular corrosion was found in the fusion zone and solid solution zone of welds in heat-treating alloys such as 6061 and Al-Zn-Mg.

1. 緒 言

近年、アルミニウム合金を船舶、車輌、橋梁などの構造物に利用する傾向が、とくに著しく増大してきているが、このようなアルミニウム合金の利用に際し、溶接施行は不可欠の作業である。このため、各種合金の溶接性ならびに溶接部の諸性能については十分な検討がなされねばならない。

アルミニウムはその性質の一つとしてのすぐれた耐食性を利用することにより、その使用分野が拡大されてきたものであるが、アルミニウム合金溶接部の耐食性に関しては断片的に述べられた文献^{1~9)}はかなりあるものの、系統的には十分研究されておらず、いまだに不明な点が多い。

そこで、筆者らは種々の環境下における各種アルミニウム合金溶接部の耐食性を比較検討するために、1年間の腐食試験を実施し、溶接部の腐食挙動を調査した。

2. 供試材および試験方法

2.1 供試材

供試材には非熱処理合金として1080, 5052, 5083の3種、

熱処理合金として6061とAl-Zn-Mgの2種、計5材質を選んだ。各材質の仕様は、非熱処理合金がO材とH材、熱処理合金がT4材とT6材で、いずれも厚さ4mmの板材を採用した。

試験は母材と溶接材とについて実施したが、溶接は各材質について2種類の溶加材を用い、突合TIG溶接を施し、『余盛あり』と『余盛削除』の試験片を作製した。

母材ならびに溶加材の化学組成をTable 1に、母材と溶加材の組合せをTable 2に示した。

2.2 試験方法

試験は曝露試験と浸漬試験を実施したが、腐食環境として前者は海上霧団気と工場霧団気、後者は清浄海水と工業用水を選定した。

試験片はPhoto. 1のごとくチタニウム線を用いてアルミニウム合金製枠に結び、チタニウム線と試験片との接触部は白色ペイントを塗布して絶縁した。

海上ならびに海水試験を実施した地区は三重県志摩郡志摩町の入江で、上記試験枠を真珠養殖用のいかだの上（海面上約30cm）ならびに下（海面下約2m）に吊り下げた。

一方、工業用水は名古屋市の水で、住友軽金属工業㈱名古屋工場内用水プール中に枠を浸漬し、工場霧団気は同工

* 研究部 工学博士

** 研究部

Table 1 Chemical composition of parent metals and filler metals.

Materials		Chemical compositions (%)								
		Mg	Zn	Si	Mn	Cr	Ti	Zr	Cu	Fe
Parent metals	1080	0.001	0.001	0.042	0.002	0.001	0.001	—	0.003	0.089
	5052	2.53	0.01	0.09	0.01	0.20	0.01	—	0.01	0.26
	5083	4.40	0.02	0.08	0.60	0.17	0.01	—	0.04	0.21
	6061	0.95	0.01	0.61	0.02	0.24	0.04	—	0.22	0.19
	Al-Zn-Mg	1.55	4.41	0.05	0.33	0.01	0.01	—	0.01	0.18
Filler metals	1080	0.001	0.001	0.042	0.002	0.001	0.001	—	0.003	0.089
	1100	0.01	0.01	0.13	0.01	0.01	0.01	—	0.02	0.58
	5052	2.53	0.01	0.09	0.01	0.20	0.01	—	0.01	0.26
	5183	4.79	0.01	0.18	0.70	0.10	0.01	—	0.02	0.29
	5356	5.22	0.04	0.07	0.11	0.11	0.10	—	0.01	0.08
	4043	0.01	0.01	5.20	0.01	—	0.01	—	0.01	0.21
	Al-Zn-Mg	1.98	4.12	0.08	0.31	0.01	0.01	0.17	0.01	0.19

Table 2 Combination of parent metals and filler metals.

Parent metals	Filler metals (A)	Filler metals(B)
1080	1080	1100
5052	5052	5183
5083	5183	5356
6061	4043	5356
Al-Zn-Mg	Al-Zn-Mg	5356

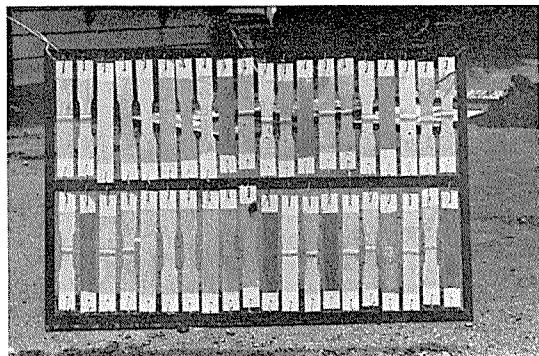


Photo. 1 Appearances of the rack setting up the specimens
upper: exposed at marine atmosphere for 3 months.
lower: immersed in sea water for 3 months

Table 3 Analysis of water

	Sea water	Industrial water
pH	8.10	6.52
Relative conductivity, $\mu\text{v}/\text{cm}$	47530	1558
Total solid, ppm	35840	855.0
Ignition remnants, %	30460	—
Ignition loss, %	5380	—
M-alkalinity, %	115	57.0
Total hardness, %	5915	174.8
Oxygen demand, %	4.0	—
Chlorine ion, %	17920	305.0
Ammonium ion, %	Tr	10.0
Nitrous ion, %	%	—
Nitric ion, %	%	—
Ferric ion, %	%	0.8
Calcium ion, %	377.4	—
Magnesium ion, %	1208.1	—
Sulfuric ion, %	2572	158.0
Silica, %	—	22.8

場内屋外に曝露した。なお、海水および工業用水の水質分析結果の一例を Table 3 に示す。

腐食期間は最大 1 年で、その間 3 ヶ月、6 ヶ月の時点においても調査した。

腐食の判定は、外観調査、引張試験によって行ない、必要に応じて腐食部の断面顕微鏡組織も観察した。

3. 試験結果

3.1 外観状況

3.1.1 海上雰囲気曝露試験片

試験期間が長くなるにつれて表面の光沢がうすれ、細かいピットがほぼ全面に発生してくるが、腐食程度はあまり著しくない。

材質間の差はほとんどみられず、同一材質における仕様の差もあまり顕著でない。

溶接金属、熱影響部と母材との間の外観上の相違もあまりはっきりしないが、5052合金ではビード境界部にややピットが多いようである。熱処理合金では母材および熱影響部に比して溶接金属の侵食程度は少ない。

溶加材による腐食の差は認められないが、“余盛削除”のために表面切削した板の母材部分の腐食は、いずれの材質においても“余盛あり”的試験片の母材部分（圧延面）より

著しく、小さな腐食孔が集って大きく拡大したようにみえる。圧延面と切削面との酸化皮膜の状態の差にもとづく現象と考えられる。

Photo. 2 に一年間曝露した試験片の外観の一例を示す。

3・1・2 海水浸漬試験片

Photo. 1 にも示すごとく、海中に浸漬した試験片には多量の海生物が着生して、試験片表面を覆い、海水と直接接触する部分はきわめて少なくなっているように思われる。これら海生物（主として海藻類および微小貝類）を除去した後の各試験片表面を観察したが、海水と接していた部分は一様に変色しており、光沢もほとんどなくなっているが、海生物が付着した部分で、これらを除いた跡は金属光沢を残しており、変色もあまり起っていない。変色の状況は、1080, 5052, Al-Zn-Mg合金は黄褐色、6061と5083合金は暗褐色ないし黒色である。

1年を通じて非熱処理合金にはいずれも腐食は認められず、仕様の差、表面切削の有無による差もなく、溶接部と母材との差もみられない。また、溶加材による外観の相違もみられなかつたが、溶接ビードとその近傍の幅5~10mmの領域の変色程度がやや少なかつた。

一方、熱処理合金では浸漬3ヶ月後すぐに細かい腐食が母材部に点在しており、6061合金ではT6材の方が著しいが、Al-Zn-Mg合金ではT4材の方が著しい。1年間浸漬しても溶接ビード上には腐食は発生しないが、熱影響部の腐食は6061合金ではT4材、Al-Zn-Mg合金ではT4、T6いずれにも認められた。熱影響部の腐食は6061合金T4材およびAl-Zn-Mg合金T6材では母材部のそれよりかなり著しいが、Al-Zn-Mg合金T4材では母材部と大差がない。なお、溶加材、表面切削の有無による相違は認められなかつた。

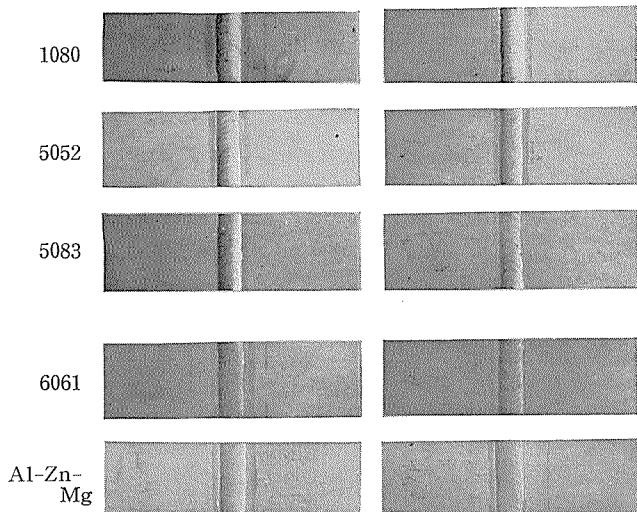


Photo. 2 Appearances of welds with filler metals (A) exposed at marine atmosphere for a year.

Photo. 3 に1年間浸漬した試験片の外観を一部示すが、清浄海水による腐食は海生物付着により、浸漬期間と腐食の進行との関連性が明確にはとらえられなかつた。

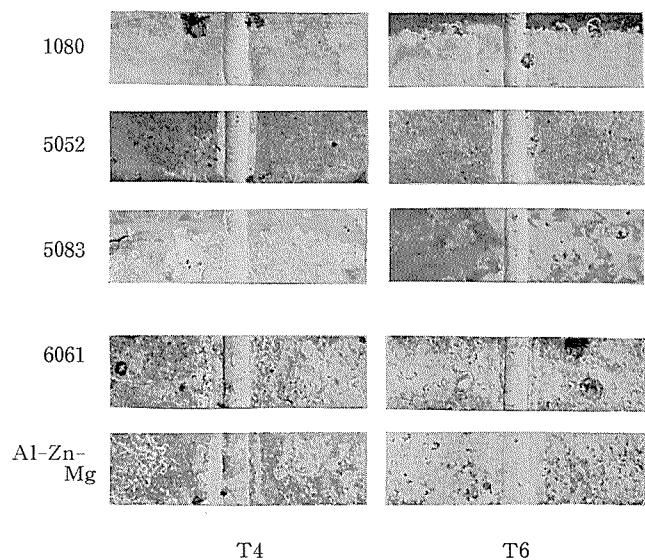


Photo. 3 Appearances of welds with filler metals (A) immersed in sea water for a year.

3・1・3 工業用水浸漬試験片

Photo. 4 に代表試験片の1年間浸漬後の外観状況を示すが、試験片全体の変色は海水に浸漬した場合とよく似ており、全般には褐色の度合が濃く、汚れが著しい。

非熱処理合金のうち、5052および5083合金には腐食が認められなかつたが、1080には細かいピットが多数発生しており、H材よりO材の方が、その数は多いようである。溶接ビード部分は光沢がかなり残っており、変色も少ない。また、熱影響部は変色はあまりしていないが、母材部よりさらに光沢が少ない。5052と5083合金ではビード境界部がやや黒っぽい。

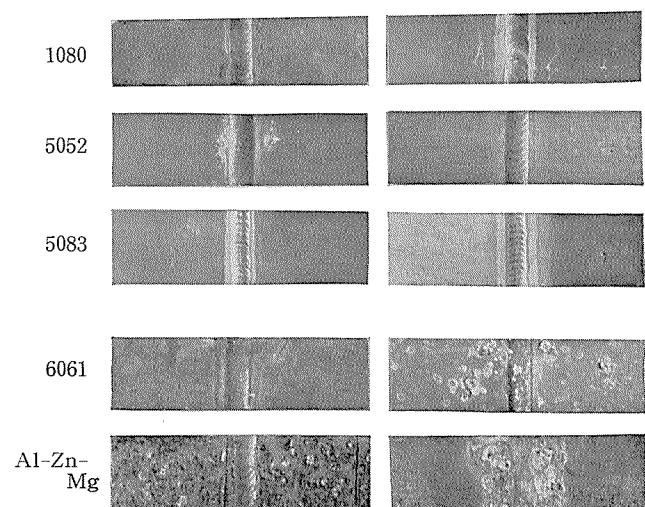


Photo. 4 Appearances of welds with filler metals (A) immersed in industrial water for a year.

6061合金は溶接ビード以外の部分に腐食が点在しており、T4材よりもT6材の方が腐食部は大きく、深い。ビード上には腐食はほとんどみられず、光沢もかなり残っている。また、溶接ビード境界部は5083と同様、黒っぽく変色している。

Al-Zn-Mg合金の場合、T4材では溶接ビードを残し、他は全面同程度に、非常にはげしく侵食されているのに対し、T6材は熱影響部のみT4材と同じように腐食している。T4材、T6材とともに1年間浸漬のものでは、5356溶加材を用いた試験片の熱影響部は腐食により損傷している。しかしながら、T6材の母材部（非熱影響部）は比較的健全である。

いずれの合金も溶加材による相違はほとんどみられないが、表面切削の影響は熱処理合金にのみみられ、6061合金T4、T6材とAl-Zn-Mg合金T6材で表面を切削したものは非削材より多少腐食が少ない。

3・1・4 工場雰囲気（大気）曝露試験片

海上曝露試験片に比して表面の汚染は著しいが、腐食状況には大差はない。

各試験片とも全面に細かいピットが多数発生し、光沢はほとんどなくなっているが、ビード上ならびに表面切削材は多少光沢が残っている。

材質間の差、同一材質における仕様の差は明確でなく、溶接の有無による差もあり頗著でないが、溶接ビード境界部はやや黒っぽく変色しており、表面切削材は非削材より多少この程度が大きい。Al-Zn-Mg合金T6材の表面切削材の熱影響部は母材部に比し白っぽい。溶加材による溶接部の外観の相違はみられない。

Photo. 5に1年間曝露した代表試験片の外観を示す。

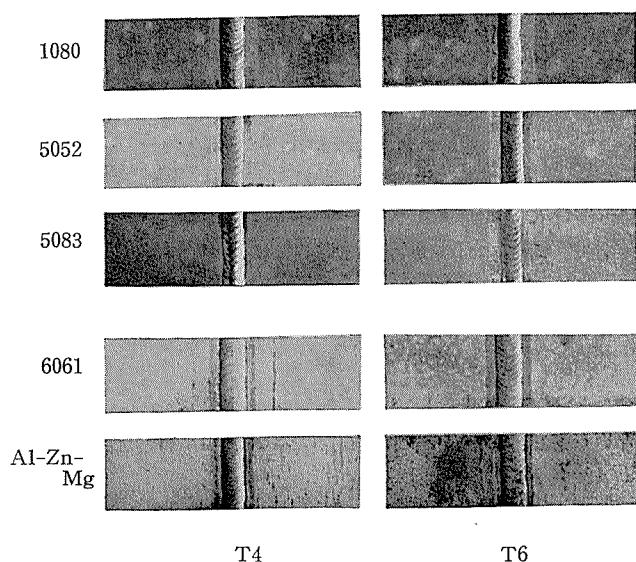


Photo. 5 Appearances of welds with filler metals (A) exposed at industrial atmosphere for a year.

3・2 引張性質の変化

腐食環境が工場雰囲気および海上雰囲気の場合、試験片に発生する腐食は細かいピットであるため、引張性質にはほとんど影響を与える、一部の試験片でわずかに伸びが減少する程度で、試験期間中の引張性質の変化は問題にならない。

海水中に浸漬した場合は、海生物の付着により腐食の傾向が一定しないが、各試験片の引張性質にはほとんど変化がなく、Al-Zn-Mg合金のみわずかに伸びが低下する傾向がみられる。

以上、3環境においては引張性質への腐食の影響はほとんどみられず、母材の仕様、切削の有無などによる相違も認められないが、工業用水の場合、とくにAl-Zn-Mg合金において著しい変化が認められた。すなわち、溶接材は浸漬3ヶ月で著しく強さが低下し、6ヶ月で強さ、伸びともほぼ零になる。母材のT4材は6ヶ月ではまだ多少強さを保っているが、1年後にはやはりほぼ零に等しくなる。これに対し、T6材母材は伸びはかなり低下するが、強さは80%程度に減少するだけである。他の合金のうち、非熱処理材はわずかに伸びが低下する程度で、大きな変化はないが、6061合金は伸び、強さともに多少減少する。

Fig. 1 および2にAl-Zn-Mg合金の海上曝露および工業用水に浸漬した試験片の引張性質の変化を一例として示す。

各試験片の各環境における腐食の引張性質に与える影響を総括するとTable 4のごとくになる。なお、Table 4は引張強さ、耐力、伸びのすべてを考慮して5段階に分類、評価して示した。

3・3 ピット分布および深さ

試験片に発生するピットは、とくに曝露試験片において顕著にみられたので、海上雰囲気に1年間曝露した溶接材（Table 2における溶加材(A)による余盛ありの試験片）についてピットの分布と平均深さを測定した結果をFig. 3および4に示す。

ピット数は実体顕微鏡を用い、表面を10倍に拡大して認められるピットのすべてを集計した。また、深さは各領域(A～G)内から20個のピットを任意に選び、顕微鏡の焦点深度により測定した。なお、測定に先立ち、試験片はリン酸-クロム酸混合溶液中で煮沸し、腐食生成物をできる限り除去した。

Fig. 3からわかるごとく、非熱処理合金では5052合金の溶接ビード境界部に多数のピットが集中している以外にははっきりした傾向はみられない。一方、熱処理合金では溶接部のピット数がいずれも少なく、Al-Zn-Mg合金では熱影響部と母材部とで大差はないが、6061合金は熱影響部が母材部よりやや数が多くなっている。

平均ピット深さは非熱処理合金では溶接金属部でやや浅いが、他の部分ではかなりバラついており、はっきりしな

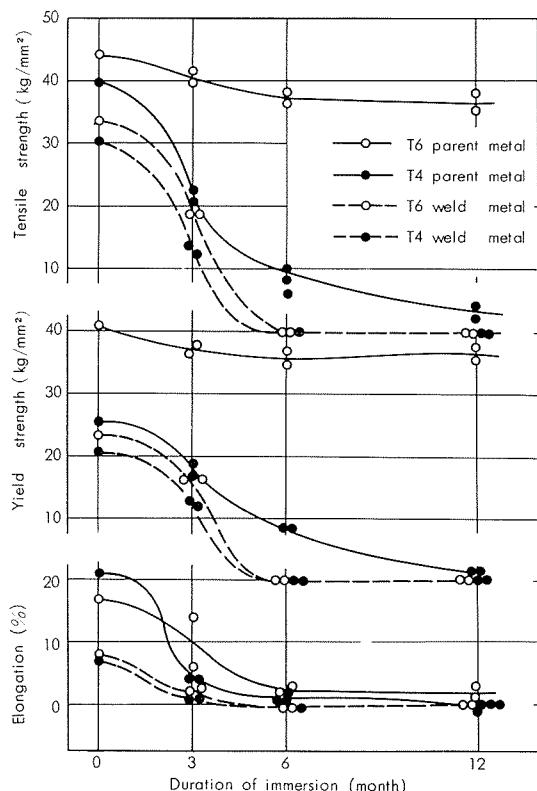


Fig. 1 Change in tensile properties of Al-Zn-Mg alloys immersed in industrial water.

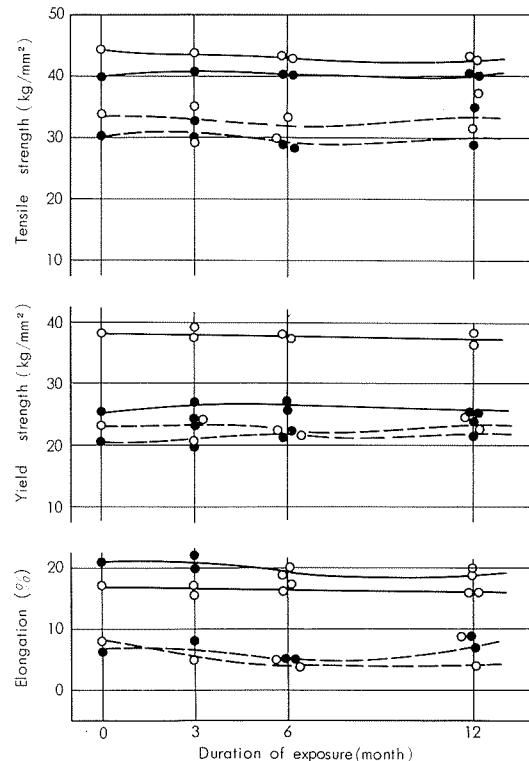


Fig. 2 Change in tensile properties of Al-Zn-Mg alloys exposed at marine atmosphere.

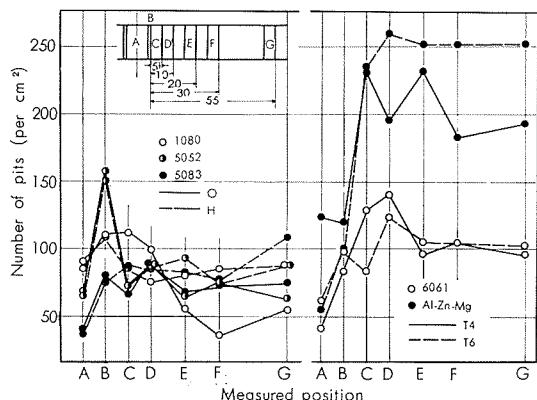


Fig. 3 Number of pits at the positions of specimens exposed at marine atmosphere for 1 year.

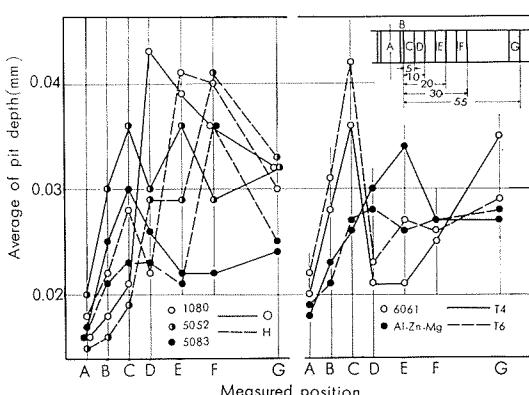


Fig. 4 Average of pit depth at the positios of specimens exposed at marine atmosphere for 1 year.

い。Al-Zn-Mg合金も溶接金属部で浅いが、6061合金はビードに隣接した部分でやや深くなっている。

全体にピット数は多いが、きわめて浅く、溶接材の位置による相違あまり顕著ではない。

3・4 腐食部断面調査

各試験片の腐食部断面の組織を顕微鏡により調査した結果、非熱処理合金では腐食と合金組織との間にとくに関連性はないようである。

Photo. 6 に3ヶ月海上および海中で試験した5052合金溶接ビード境界部に生じた腐食部断面組織の一例を示すが、溶接金属部分がやや粒界腐食らしい様子がみられるものの、母材部あるいは熱影響部との著しい差はみられない。

熱処理合金では環境、仕様によって溶接熱影響部、ビード境界部が著しく侵食される現象が観察されたが、これらの腐食の大半がいずれも粒界腐食である。この傾向は6061合金では比較的小ないが、Al-Zn-Mg合金のビード境界部においてはきわめて著しい。

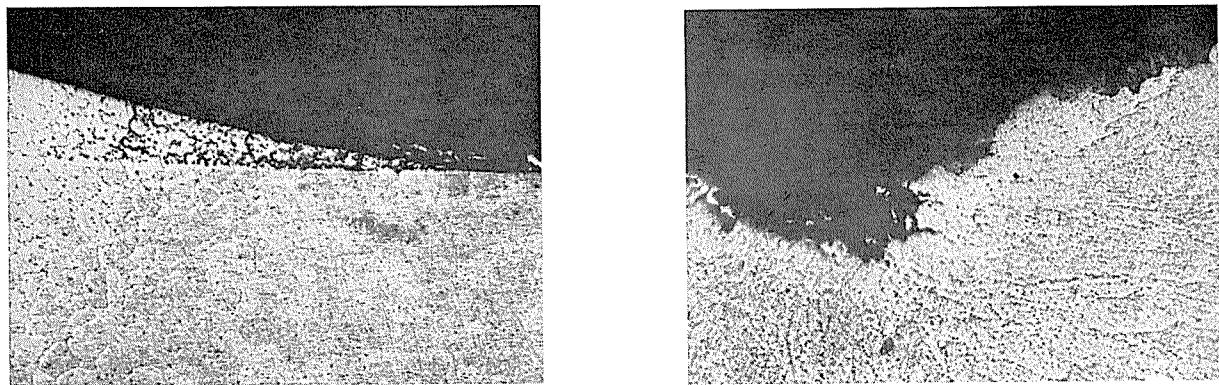
溶接熱影響部の腐食は6061合金ではT6材の方がT4材より深くまで侵食しているが、Al-Zn-Mg合金ではT4材の方が腐食ははげしい。

Photo. 7 にAl-Zn-Mg合金T4材のビード境界部の粒界腐食の一例を、また、Photo. 8 にAl-Zn-Mg合金T4およびT6材の熱影響部の腐食例を示す。

Table 4 Evaluation of corrosion behavior of aluminium alloy welds by tensile properties.

Materials		Corrosion environment			
		Ind. atm.	Mar. atm.	Sea water	Ind. water
1080	O	○	○	○	◐
	H	○	○	○	◐
5052	O	○	○	○	◐
	H	○	○	○	◐
5083	O	○	○	○	◐
	H	○	○	○	◐
6061	T 4	○	○	○	◐
	T 6	○	○	○	◐
Al-Zn-Mg	T 4	○	○	◐	●
	T 6	○	○	◐	●

○ Very good ◐ Good ⓧ Fair ⓧ Poor ● Very poor

Photo. 6 Microstructures of 5052 alloy bonds. ($\times 100$)

left: exposed at marine atmosphere for 3 months (O-plate, filler metal: 5052)
right: immersed in sea water for 3 months (H-plate, filler metal: 5052)

4. 考 察

以上の実験結果を総括すると Table 5 のごとくて、曝露試験においては、総じて溶接部の耐食性は良好であるが、浸漬試験の場合、熱処理合金には著しい腐食を生ずることがある。

アルミニウム合金の溶接部の腐食について断片的に述べられたこれまでの文献によると、非熱処理合金の場合は、

溶接部がとくに侵食された例は少ないが、Brenner⁴⁾は Al-Mg 合金の場合、母材の性状により腐食の挙動が異なると述べており、Booth と Budd⁵⁾も 5 年間の大気曝露により Al-Mg 合金 TIG 溶接材が腐食により多少強さが低下することを示しているなど、Mg 含有量の多い合金では溶接部の腐食が多少問題になることを暗示している。

一方、熱処理合金においては溶接部および熱影響部は、

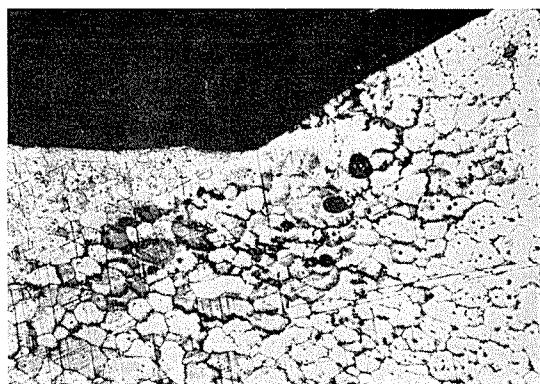


Photo. 7 Microstructures of Al-Zn-Mg alloy bonds. ($\times 100$)
 left: immersed in sea water for 3 months (T4 plate, filler metal: Al-Zn-Mg)
 right: exposed at marine atmosphere for 3 months (T4 plate, filler metal: 5356)

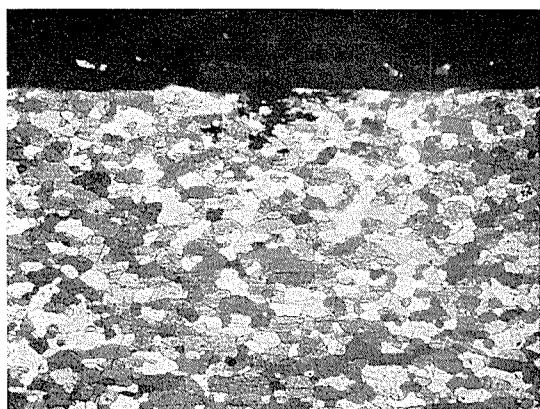
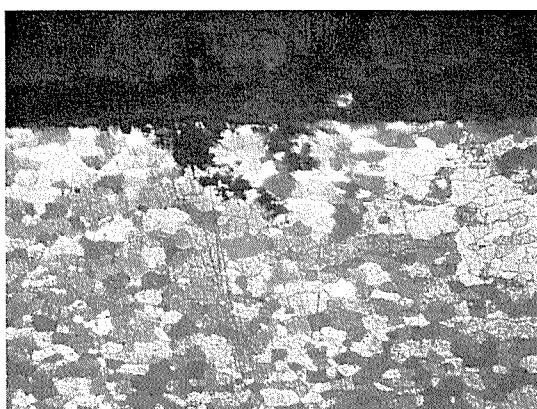


Photo. 8 Microstructures of heat-affected zone of Al-Zn-Mg alloy exposed at marine atmosphere for 3 months. ($\times 100$)
 left: T4 plate, filler metal: Al-Zn-Mg
 right: T6 plate, filler metal: 5356

Table 5 Evaluation of corrosion behavior of aluminium alloy welds.

Materials	Corrosion environment			
	Ind. atm.	Mar. atm.	Sea water	Ind. water
1080	O	○	○	○
	H	○	○	○
5052	O	○	○	○
	H	○	○	○
5083	O	○	○	○
	H	○	○	○
6061	T4	○	○	○
	T6	○	○	○
Al-Zn-Mg	T4	○	○	○
	T6	○	○	○

○ Very good ○ Good ○ Fair ○ Poor ○ Very poor

各部分において組織的な相違が著しく、とりわけ析出状態が異なるため、腐食挙動も異なってくると思われ、この点は十分検討する必要がある。これまでにも組織との関連で腐食挙動を調べた文献はいくらかみられる。たとえば、先の Booth と Budd⁵⁾ は Al-Mg-Si 系合金の溶接部の腐食による強さの低下は、Al-Mg 合金よりわずかに大きいと述べているし、Kostron と Müller-Busse⁷⁾ は Al-Mg-Cu 系合金 T 4 材の溶接部近傍に層状腐食や粒界腐食が生

ずることを示している。また、Collins¹⁰⁾ は 2 種の Al-Zn-Mg-Cu 系合金の溶接部近傍の電極電位を測定し、この部分の腐食感受性が熱処理により著しく変化することを示している。

本実験結果においても、とくに Al-Zn-Mg 合金の浸漬試験片において T6 材の熱影響部にはげしい腐食が生じており、T4 材ではビード部以外で全面が同程度に侵食されている。

このため、Table 2 に示す溶加材(A)を用いた溶接材の余盛ありの試験片について、各部分の食塩水中における電極電位を測定した結果、Fig. 5 が得られた。測定は日立堀場 M-5型 pH-Meter を用い、マイクロチップによる 24 時間後の安定値を図示した。Fig. 5 からわかるように、非熱処理合金中では、1080 がかなり卑 (less noble) の値を示し、O 材と H 材の差が著しく、溶接部とその隣接領域が母材より貴 (noble) な値を示しているが、5052 と 5083 合金にははっきりした傾向がみられない。一方、6061 合金は T4 材では熱影響部がやや卑であるのに対し、T6 材は全体に卑である。さらに、Al-Zn-Mg 合金は T4 材が全体に卑であるのに対し、T6 材は熱影響部が T4 と同程度に卑であるが、

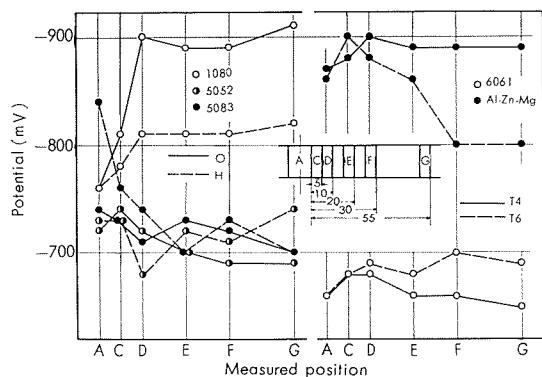


Fig. 5 Anode potential at the positions of specimen.

母材部はかなり貴になっている。

電極電位の値と腐食挙動とは、アルミニウム合金の場合は一般に必ずしも十分な対応を示さない。

本実験結果においては、Al-Zn-Mg合金の工業用水浸漬試験片の腐食挙動が電極電位から暗示される腐食感受性とかなりよい対応を示したが、溶接金属部の健全性など、電位からだけでは十分説明されないものも多くみられた。

このため、溶接金属部分の耐食性について、5083およびAl-Zn-Mg合金について補足実験を行なってみた結果、両者とも突合溶接材では明らかに溶接金属部は健全であるが、板全面に溶接ビードを盛った試験片では、同一条件下において溶接金属中央部あるいは溶接金属同志の境界部に腐食が発生することが確認された。この場合、突合溶接材では溶接金属部とその他の部分との電極電位の値の差から説

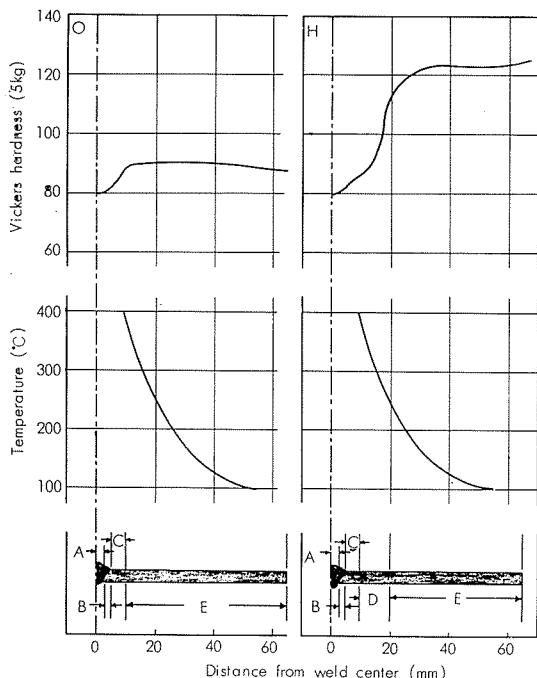


Fig. 6 Hardness distributions and maximum peak temperatures of TIG-welds made with 5356 filler metal in 5083 alloy.

明できるものも二、三はみうけられたが、全体の傾向は明瞭でなく、全面溶接材では電位差は認められなかった。一方、5083合金をAl-Zn-Mg合金溶加材で突合溶接した場合には、溶接金属部がきわめて卑なる電位を示し、この部分のみ著しい腐食を生じた。

このように電極電位はその部分の腐食感受性をある程度示唆するものの、実際の腐食挙動は電位だけからは判断すべきではないと思われる。

ここで、試験片の組織と電極電位あるいは腐食挙動との関連を明らかにするために、溶接による試験片各部の最高温度とかたさの関係を5083およびAl-Zn-Mg合金について測定した結果をFig. 6と7に示す。非熱処理合金の5083は熱影響部が再結晶により軟化しているのみで、著しい変化はみられないが、熱処理合金であるAl-Zn-Mg合金では、T4材では熱影響部と母材とのかたさの差は時効後はほとんど大差ないが、T6材では溶体化域（Cの部分）と過時効域（Dの部分）におけるかたさの変化がみられる。T6材において著しく腐食した領域はビード境界から15mm以内の部分で溶体化域に相当する。この部分のかたさはT4材の溶体化域と同程度でT4材母材部とも大差はない。

Al-Zn-Mg合金の熱影響部の析出状態を確認するためには、溶接試験片の各部分の電子顕微鏡観察をレプリカ法により行なった結果、T6材の過時効域ならびに母材部分にはM'($MgZn_2$)と思われる中間相の析出が認められるが、T6材の溶体化域およびT4材の各部にはこのような析出はみられない。（Photo. 9参照）

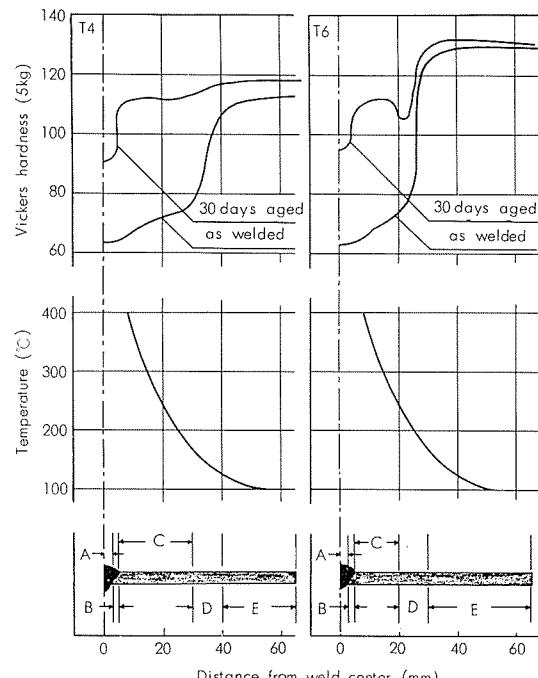


Fig. 7 Hardness distributions and maximum peak temperatures of TIG-welds made with 5356 filler metal in Al-Zn-Mg alloy.

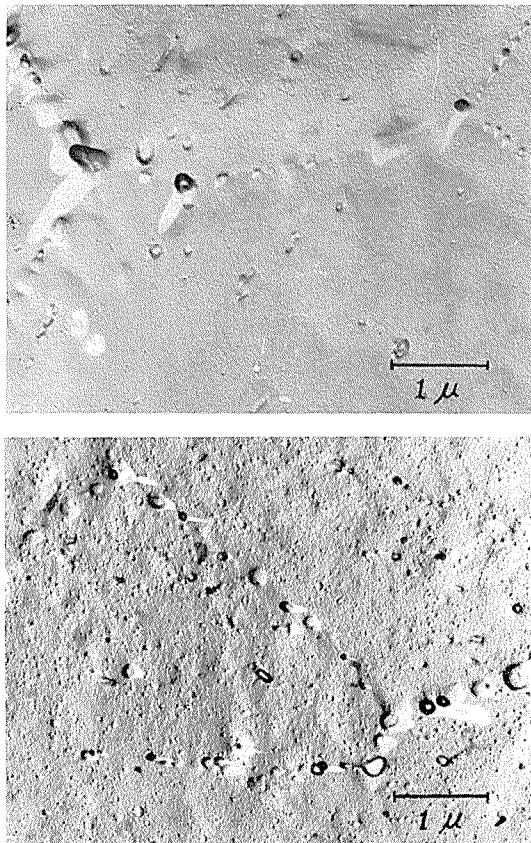


Photo. 9 Electron-microstructures of heat-affected zone in welded joint of Al-Zn-Mg-T6 plate.
upper: solid solution zone (10 mm from bead center)
lower: over aged zone (23 mm from bead center)

したがって、Al-Zn-Mg 合金の熱影響部においても、溶接ビードの近傍（20mm以内）の溶体化域はT4, T6材とともにG.P. zone（溶接後の常温時効で形成）のみ存在し、T6材の過時効域（ビード中心より20~25mmの部分）では、G.P. zoneとM' (MgZn₂) が存在する。このM' (MgZn₂) 中間相はT6母材[G.P. zoneとM' (MgZn₂) が存在]における中間相がいく分粗大化したものであろう。なお、T4材の母材部にはM' (MgZn₂) は存在しない。

これらより考察するに、Al-Zn-Mg合金においては、固溶体あるいはG.P. zoneのみ存在する場合には非常に腐食されやすく、M' (MgZn₂) 中間相が析出している場合には比較的腐食され難いと判断される。

5. 総括

突合TIG溶接を施した1080, 5052, 5083-O, H板ならびに6061, Al-Zn-Mg-T4, T6板について、大気、海上霧囲気、工業用水ならびに清浄海水中にて1年間の腐食試験を行なった結果、以下の諸点が明らかになった。

(1) 大気ならびに海上霧囲気中では試験片全面に細かいピットを生じ、材質、仕様の差、溶接の影響などはほとんどみられない。

(2) 海水、工業用水中でも1080, 5052, 5083合金溶接部はきわめて良好な耐食性を示すが、6061, Al-Zn-Mg合金では溶接熱影響部に腐食が集中するものがある。

(3) 腐食による引張性質の変化は工業用水中でのAl-Zn-Mg合金できわめて著しい低下がみられるが、他の材質ではほとんど問題にならない。また、Al-Zn-Mg合金も他の環境ではとくに問題はない。

(4) 工業用水中のAl-Zn-Mg合金はT4材では溶接ビードを除いて全面が、T6材では熱影響部（溶体化域相当）が著しく侵食されている。

(5) 热処理合金の6061およびAl-Zn-Mg合金溶接部のビード境界部および熱影響部における腐食の大部分は粒界腐食である。

(6) Al-Zn-Mg合金では固溶体あるいはG.P. zoneのみ存在する部分は腐食されやすいが、M' (MgZn₂) 中間相の析出している部分は比較的腐食され難いようである。

文 献

- 1) H. Schick, W. Helling : Aluminium, **20**(1938), 452
- 2) P. Brenner : Aluminium, **21**(1939), 846
- 3) J. Koziarski : Weld. J., **36**(1957), 141
- 4) P. Brenner : Schw. u. Schn., **11**(1957), 483
- 5) F.F. Booth, M.K. Budd : Weld. and Metal Fab., **30** (1962), 483
- 6) K.G. Latimer, F.F. Booth : Weld. and Metal Fab., **31** (1963), 509
- 7) H. Kostron, A. Müller-Busse : Metall, **4**(1950), 41
- 8) A. Müller-Busse : Aluminium, **32**(1956), 333
- 9) 軽金属溶接技術会：溶接構造用超大型強力アルミニウム合金の開発研究報告書，(1966)
- 10) F.R. Collins : Weld. J., **41**(1962), 337s

アルミニウム黄銅の淡水による応力腐食割れ
におよぼす腐食抑制剤の効果

佐 藤 史 郎*
野 世 溪 精**

住友軽金属工業株式会社

アルミニウム黄銅の淡水による応力腐食割れ におよぼす腐食抑制剤の効果

佐藤 史郎* 野世 溪精**

Effects of Corrosion Inhibitor on Stress Corrosion Cracking of Aluminium Brass in Fresh Water

by Shiro Sato and Tadashi Nisetani

The investigation was carried out to make clear the effects of a corrosion inhibitor to the stress corrosion cracking of aluminium brass tubes in fresh water. The tests were conducted for about a year at two refineries using fresh feed water and recirculating water containing 50 ppm of an inhibitor.

Results obtained were as follows:

- 1) Tubes with non-inhibited water showed many small pits, and it seemed that the applied tensile stress did not accelerate the pitting corrosion. On the other hand, no pit was found on tube surfaces with inhibited water.
- 2) In the tests at both refineries the stressed tubes with non-inhibited water had cracks. However, those with inhibited water were free from crack. It was shown that an addition of the inhibitor is useful for preventing the stress corrosion cracking of aluminium brass in fresh water.
- 3) Cracks occurred at pits or deformation bands [perpendicularly to the applied stress and the path was transgranular. From this fact it was assumed that the stress concentration at pits or deformation bands is a substantial factor for the stress corrosion cracking.
- 4) The corrosion inhibitor added to the recirculating water was a mixture of sodium-chromate and poly-hexametaphosphate. In this stage, it was not clear whether the effectiveness in the tests was due to either of these components or to their mutual function.

1. 緒言

淡水を冷却水に使用している熱交換器のアルミニウム黄銅管にしばしば応力腐食割れによる事故が生じておる、装置保守上の重要な問題の一つになっている。

この現象に関してはすでにある程度の研究や調査が実施されてきているが十分に解明されているとはいひ難く、たとえば応力腐食割れを惹起する腐食媒についてもよくわからっていない状況にある。^{1~3)} ただ、経験例から水質と割れ発生の傾向との間に密接な関係が存在することは疑う余地がない。

最近の石油精製プラントにおいてはコンデンサーなどの熱交換器の冷却水に淡水を用いるものが増加する傾向になり、そこにおいては冷却用の淡水を冷却塔で冷却しつつ循環して使用するものが多い。

そして、その循環水には防食とスライム発生防止の観点から何らかの水処理—腐食抑制剤の添加一が行なわれているのが一般的である。しかし、その腐食抑制剤の選択はも

っぱら鉄系の機器の防食を対象とするものであって、銅および銅合金の機器の防食を対象とするものではない。

アルミニウム黄銅管の応力腐食割れと水処理—腐食抑制剤の添加一の関係を解明することの重要性はすでに石油学会の腐食研究委員会などにおいても指摘されてきているが、今日のところまだよく知られていない。

昭和41年の初めに、熱交換器の冷却媒として冷却塔を用いた循環方式による淡水を用いているA、B両製油所の好意により、両製油所の原水（腐食抑制剤を添加していない水）と循環水（腐食抑制剤を添加している水）を用いて応力腐食試験を実施する機会を得て、つぎに記すようなテストを約一ヶ年にわたり実施した。

2. 試料と試験方法

2・1 試料

試料としてTable 1に示すアルミニウム黄銅管を用いた。

2・2 応力腐食試験機

Photo. 1に示すようなスプリング式応力腐食試験機を用いた。この試験機において、各々の試験管には2個のス

* 研究部 工学博士

** 研究部

Table 1 The tubes used in the test.

(1) Chemical compositions(%)

Cu	Zn	Al	Si	As	Fe	Pb
78.2	R	2.0	0.22	0.05	<0.01	<0.01

(2) Mechanical properties

$\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	σ_b (kg/mm ²)	Elongation (%)	Rockwell hardness(F)	Grain size(mm)
15.7	41.0	64	74.1	0.020

(3) Size (mm)

Diameter	Thickness	Length
16.0	1.0	2,000

プリングのたわみによって生じた一定の力が作用して、所定の大きさの引張応力を管に生ぜしめた。

2・3 応力腐食試験

4基の試験機No. 1, 2, 3, 4に取付けた管にそれぞれAおよびB両製油所の原水および循環水を通じた。各試験機の管には引張ひずみ量として0, 0.05%, 0.10%および降伏点以上のひずみを与えた。

試験条件と供試管のマークを一括してTable 2に示した。付加したひずみ量は管の中央部にストレインゲージを貼付して測定し、それにもとづいて調整した。付加ひずみ量の実測値をTable 3に示した。試験管に通した水の分析値をTable 4に示した。

3. 試験結果**3・1 経過**

A製油所では1967年4月8日より、B製油所では1967年4月21日より試験を開始した。

1967年7月8日、1—4管が管端部より破断した。調査の

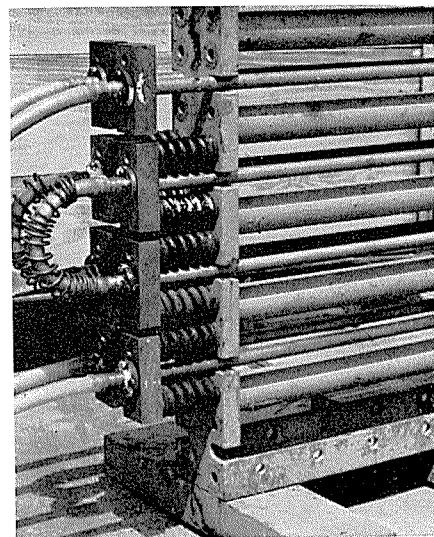


Photo. 1 Stress corrosion test apparatus. The stress is applied by compressing two springs fixed to each tube.

結果、内面側より応力腐食割れを生じていることがわかった。割れ部を除き更にテストを続行した。また、1968年5月に3—4管が管端近傍において管外側より割れを生じて漏洩した。

A製油所では1968年7月1日、B製油所では1968年5月9日にそれぞれテストを完了した。

3・2 外面状況

A製油所の管は黒く変色していたが、外側からの腐食は軽微であった。

B製油所の管は黒色の厚い腐食生成物を生じ、かなり激しい腐食を受けていた。この腐食生成物を分析した結果、ほぼ Cu₂S に相当する成分のものであることがわかった。

また、3—4管には明らかに管外側から生じたとみなさ

Table 2 Conditions of the stress corrosion test and mark of the test tubes.

Plant name	Period	Test apparatus (No.)	Water	Applied strain(%)and mark			
				0.00	0.05	0.10	ε_y^*
A	Apr. 8, '67~July 1, '68	1	Feedwater	1—1	1—2	1—3	1—4
		2	Recirculating water	2—1	2—2	2—3	2—4
B	Apr. 21, '67~May 9, '68	3	Feedwater	3—1	3—2	3—3	3—4
		4	Recirculating water	4—1	4—2	4—3	4—4

* : ε_y yielding strain

Table 3 Applied strains(%) to the test tubes.

Measurement Strain(%)	At the beginning of the test				At the intermediate inspection*			
	0.00	0.05	0.10	ε_y	0.00	0.05	0.10	ε_y
No. 1	0.00	0.0490	0.0995	0.1555	—	0.0461	—	—
No. 2	0.00	0.0506	0.1008	0.1575	—	0.0511	—	—
No. 3	0.00	0.0495	0.1003	0.1500	—	0.0525	0.0925	—
No. 4	0.00	0.0500	0.1005	0.1853	—	0.0501	0.0983	—

* : Date of the inspection, No. 1,2 : Dec. '67, No. 3,4 : Nov. '67

Table 4 Water analyses.

Compositions	Test apparatus	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Inhibitor (ppm)	No	44.4(39.0~51.0)	No	32.9(27.0~41.0)	
NH ₄ ⁺ (ppm)	—	—	0.17(0~ 0.63)	0.55(0.1~ 1.4)	
pH	7.2(6.4~ 7.4)	7.6(7.2~ 7.9)	6.6(6.3~ 7.1)	6.7(6.0~ 7.4)	
Cl ⁻	7.9(7.2~ 9.0)	16.8(13.2~20.0)	5.3(2.5~ 6. 1)	17.0(8.0~17.5)	
Total hardness (ppm)	57.3(41.5~62.0)	80.7(60.7~89.0)	21.9(9.0~62. 0)	31.9(16.0~98.0)	
Temperature (°C)	—	—	8.1(1.0~27. 0)	19.2(15.0~28.0)	
Conductivity ($\mu\Omega\text{-cm}$)	—	—	156(65~ 300)	215(152~ 650)	

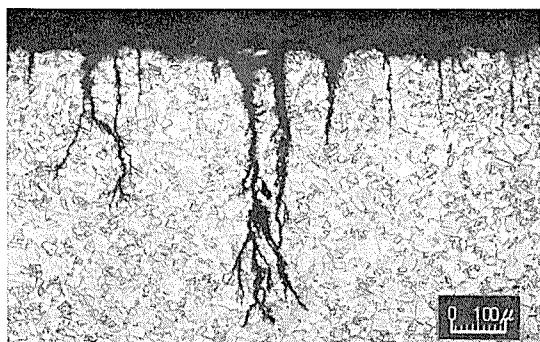
(1) Figures in parentheses show the range.

(2) The measurements were made once a week during the test.

れる割れがみとめられた。B製油所において試験機が設置されていた位置は常圧蒸留装置の近くであるが、その雰囲気の腐食性は必ずしも激しくはない。ただ、雨水の飛沫が管にかかっていたことおよび大気中には微量の硫化物が存在したことなどによって腐食と割れを生じたものとみられる。割れ部の状況とその断面の組織を Photo. 2 に示した。



(a) Cracks on the outer surface



(b) Photomicrograph of cracks (longitudinal cross section)

Photo. 2 Corrosion and cracks on the outer surface of NO. 3-4 tube by open air contaminated with trace of sulfide and moisture.

3・3 内面状況

試験機 No. 1, 2, 3 の管はいずれも茶灰色のスライム状の付着物に覆われていたが、試験機 No. 4 の管の内面には付着物はみられず、わずかに変色している程度であった。管内面を洗浄し、スライムを除去した後の状況を観察したところ、原水を通じた試験機 No. 1 および No. 3 の各管には小さな孔食がみられ、割れを生じている管も存在した。これに対して循環水を通した試験機 No. 2 および No. 4 の各管の内面は平滑であり、孔食も割れもみられなかった。

割れのみられた No. 1 および No. 3 の試験機の各管の内面状況（洗浄後）を Photo. 3 および Photo. 4 に示した。

試験機 No. 1 および No. 3 の各管の内面における割れについて、その特徴を列挙すればつきのようである。

- 1) 各管とも付加ひずみの有無および大きさとは無関係

に針孔状の小さな孔食の発生がみられる。孔食の数は試験機 No. 1 の各管の方が試験機 No. 3 の各管よりも多い。

- 2) 孔食は不規則かつ不均等に分布している。
- 3) 割れは引張ひずみを付加しなかった管を除いてすべての管にみられた。

4) 割れはすべて孔食を中心として円周方向、すなわち引張方向に直角に生じており、その分布は不規則かつ不均等である。しかし、例外として 1-4 および 3-4 の両管、すなわち降伏点以上の引張ひずみをえた管においては孔食を通らない円周方向の割れが多数生じており、これらの割れは集まってバンド状の割れ部を形成している。その一例を Photo. 5 にみることができる。

5) 孔食および割れ部の断面状況を観察すれば、Photo. 6 および Photo. 7 のようである。孔食はその底部に浅い粒界腐食を伴っており、割れはその底部から発達し、結晶粒内を通るものである。

6) 割れの肉厚方向への進行深さを断面顕微鏡観察より求めたところ、Fig. 1 のようであって、付加ひずみ量の増大とともに深さが増していることがわかる。ただし、Fig. 1 の割れ深さは各管における比較的深そうな割れ部 5ヶ所以上の断面顕微鏡観察から求められた割れ深さの値のうち、大きいもの 3 点を選んでプロットしたものである。

3・4 管内面付着物の分析

試験機 No. 1, 2 および 3 の各管の内面付着物を分析した結果、Table 5 のようであった。

Table 5 Chemical compositions of the inner deposits of the tubes (%).

Test apparatus	Compositions	NH ₄ ⁺	Cu	Fe	SiO ₂
No. 1	0.03	14.2	4.3	18.2	
No. 2	<0.01	1.4	7.1	22.4	
No. 3	0.06	1.4	15.1	15.7	

(No. 4; insufficient deposit for analysis)

4. 考 察

試験機 No. 1~4 の管につき、割れ発生がみられた管は試験機 No. 1 および No. 3 の管であり、No. 2 および No. 4 の管には割れはみられなかった。試験機 No. 1 および No. 3

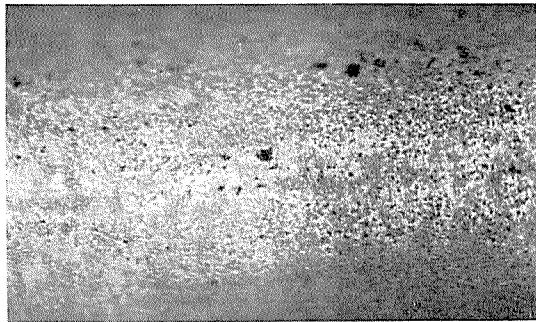
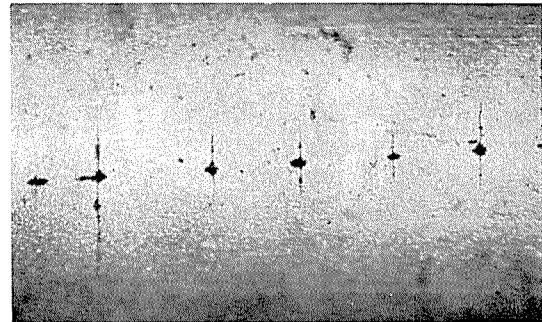
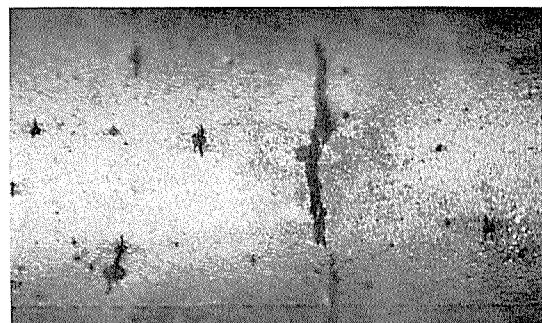
No. 1-1 ($\varepsilon=0.00\%$)No. 1-2 ($\varepsilon=0.05\%$)No. 1-3 ($\varepsilon=0.10\%$)No. 1-4 ($\varepsilon>\varepsilon_y$)

Photo. 3 Pits and cracks on the inner surfaces of the tubes fixed to No. 1 test apparatus.
The crack is circumferential and through the pit.

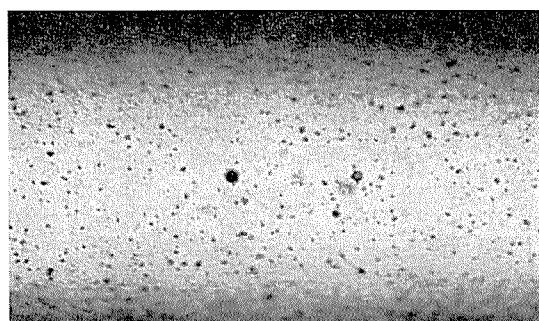
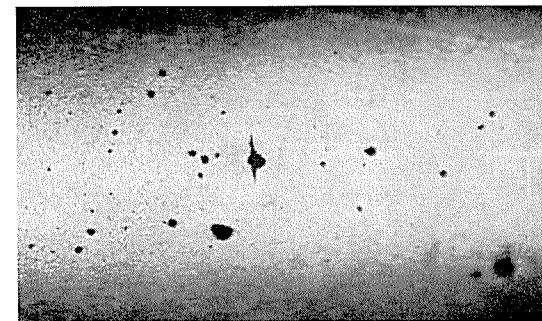
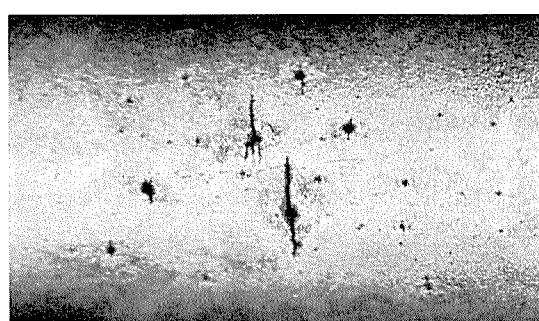
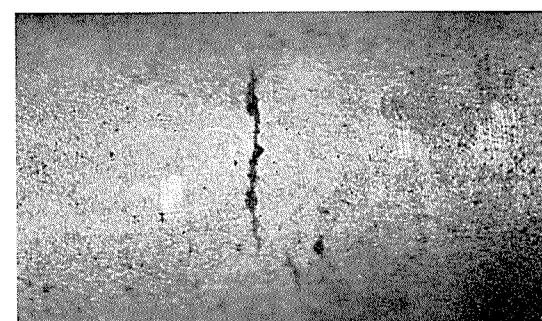
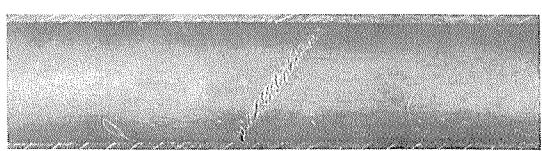
No. 3-1 ($\varepsilon=0.00\%$)No. 3-2 ($\varepsilon=0.05\%$)No. 3-3 ($\varepsilon=0.10\%$)No. 3-4 ($\varepsilon>\varepsilon_y$)

Photo. 4 Pits and cracks on the inner surfaces of the tubes fixed to No. 3 test apparatus.
The crack is circumferential and through the pit.



No. 3-4 tube 10mm

Photo. 5 Many small cracks with no pit distributed in narrow oblique band.

はA, B両製油所の原水, すなわち腐食抑制剤を添加していない未処理水を通したものであり, No. 2 および No. 4 はA, B両製油所の循環水, すなわちそれぞれの原水に腐食抑制剤を添加し冷却水として循環使用している水を通したものである。

Table 4 に示した水の分析値において, 割れが発生した

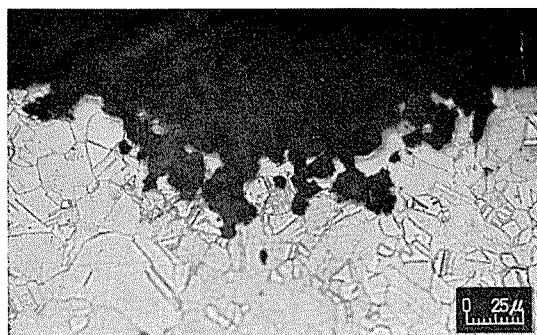
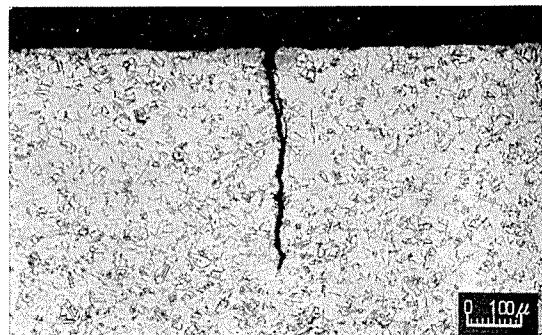
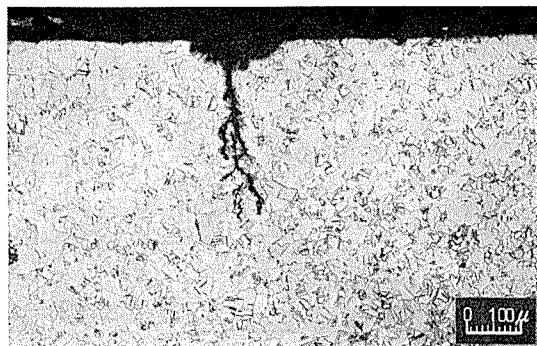
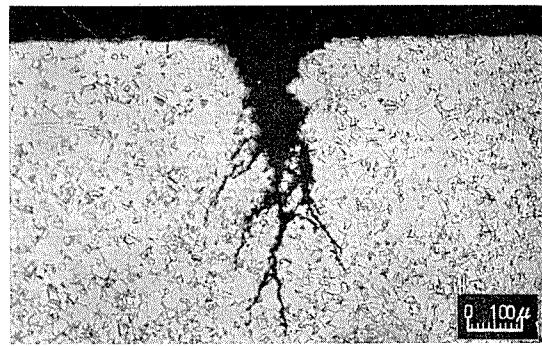
No. 1-1 ($\varepsilon=0.00\%$)No. 1-2 ($\varepsilon=0.05\%$)No. 1-3 ($\varepsilon=0.10\%$)No. 1-4 ($\varepsilon>\varepsilon_y$)

Photo. 6 Photomicrographs of pits and cracks observed on the tubes of No.1 test apparatus.
The path of the crack is mainly transgranular.

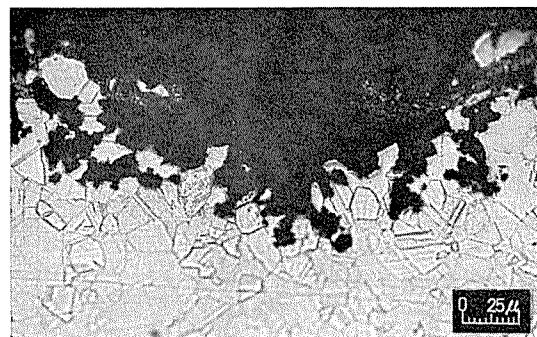
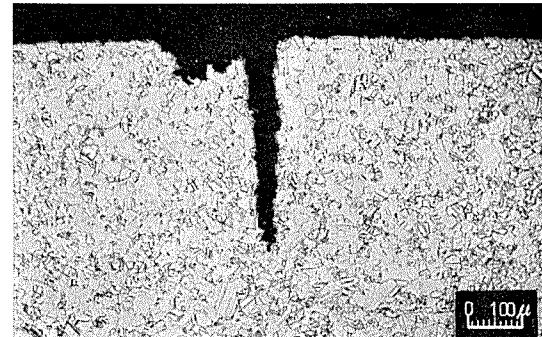
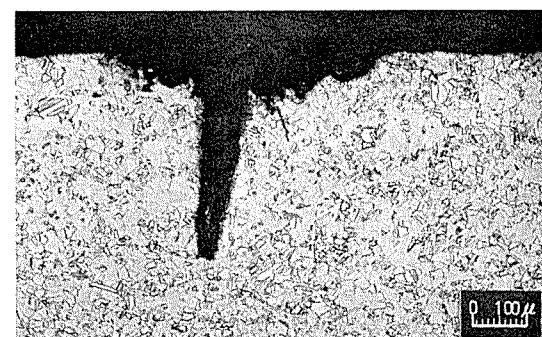
No. 3-1 ($\varepsilon=0.00\%$)No. 3-2 ($\varepsilon=0.05\%$)No. 3-3 ($\varepsilon=0.10\%$)No. 3-4 ($\varepsilon>\varepsilon_y$)

Photo. 7 Photomicrographs of pits and cracks observed on the tubes of No.3 test apparatus.
The tubes were extended slightly to detect the cracks.

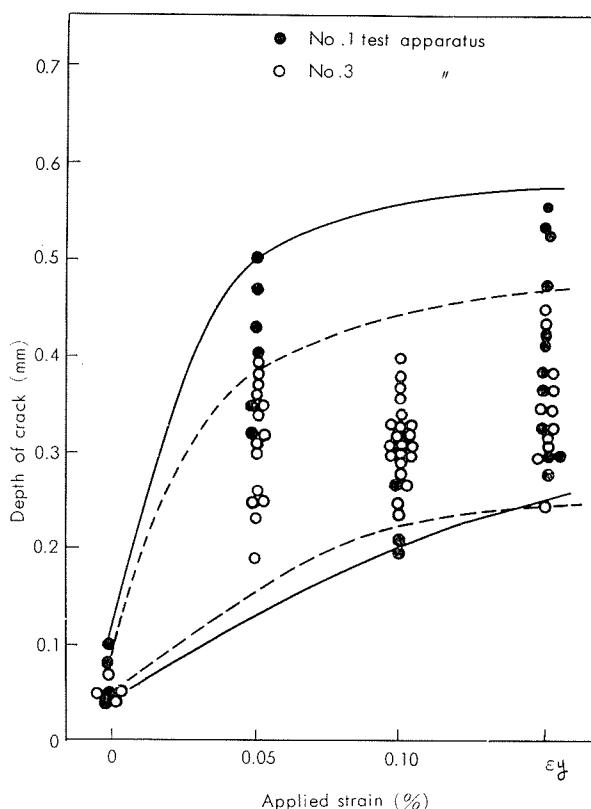


Fig. 1 Depth of cracks and applied strains of No. 1 and 3 test apparatuses.

水と割れを生じなかった水の間には腐食抑制剤の有無を除いて割れ発生の可能性に関与していると考えられる決定的な差は存在しないとみられる。したがって、割れの発生は腐食抑制剤の添加によって抑制されたものであるとみなしてよいように考えられる。

添加されていた腐食抑制剤（商品名：ポリクリン I-103）はクロム酸塩とポリメタリン酸塩の混合物であることがわかっている。アルミニウム黄銅の応力腐食割れ発生防止に関する腐食抑制剤の効果がクロム酸塩とポリメタリン酸塩のいずれかによるものか、または両者の複合作用によるものであるかは現段階では明らかではない。

本応力腐食テストで降伏点未満のひずみを与えた状態で試験した試料管に生じた割れは主として孔食を中央にしてその両側に発達した割れであり、その方向は引張方向に直角である。そして孔食は引張ひずみを与えていない管にも等しく発生している。このことから、割れが孔食部を起点として発達したものであると推察される。これに対して、降伏点ひずみ以上の引張ひずみを与えた管に生じた割れの中には斜方向の帯状の領域に円周方向の多数の割れが集中的に生じているところがあり、この割れは孔食と関係なく生じている。この部分における割れの分布状況は先にPhoto. 5 に示したようであり、Lüders band と称せられる変形帶と形状がよく似ているようにみられる。アルミニウム黄銅が降伏点ひずみ以上のひずみを受けるときに変形帶を生じて変形することは一般に確認されていることでは

ないようである。しかし、本試験において、引張ひずみ量を増加していくとき、ひずみ量が降伏点を越えたとみられるところで、それまでスプリングのたわみとともにひずみが管全域にわたって均一に増加してきたことを示すとみられるストレインゲージの伸びの指示が著しく変化し、管が均一な変形を生じないで、局部的に変形していることを示すような挙動を示した。このことから降伏点以上のひずみをえた管には不均一な変形を生じた部分が存在し、この部分が応力腐食による割れ部に相当していることを示しているように考えられる。すなわち、管に降伏点以上の引張応力が働いたときに局部的な塑性変形、いわゆる変形帶が生じ、その部分は孔食の発生と無関係に割れを生じたもののように考えられる。

黄銅の応力腐食割れが slip step を生じているようなところで応力集中作用の影響を受けて発生することは村上ら⁴⁾が単結晶を用いた実験から明らかにしている。このことから、本実験において、割れが孔食部および変形帶から生じていることはこの部分において応力集中が生じたことを示すもののように考えられる。

A, B両製油所におけるテストはともに原水を通した管に孔食の発生とそれを通る割れがあり、循環水（処理水）を通した管には孔食の発生がなく割れもまたみられなかつた。このことから、応力腐食割れに対する原水と処理水の性質の差は単に応力集中部としての孔食を発生させる性質の有無に帰せられるもののようにもみられる。しかし、変形帶における割れが原水を通した管に限って孔食を伴うことなく生じており、循環水を通した管の中には原水を通した管におけると同様の変形帶の発生とそれによる応力集中作用が存在したとみられる管があるにもかかわらず割れが生じていない。このことは割れを生ぜしめる腐食媒（原水）と生ぜしめない腐食媒（循環水）の差は孔食の発生のみならず応力集中作用による変形部の割れ発生の有無ともまた関係していることを示すものとみなされる。すなわち、原水と循環水の差、換言すれば腐食抑制剤の効果、は孔食の発生を抑制することにより応力腐食割れの起点となる応力集中点を生ぜしめないように働くばかりでなく、応力集中がたとえ生じてもその部分において生ずる可能性のある割れの発生を抑制する効果をも有するものとみるべきであると考えられる。

5. 結 び

アルミニウム黄銅管の淡水による応力腐食割れ現象における腐食抑制剤の効果について検討するために、スプリング式応力腐食試験機を用いてA, B両製油所においてテストを実施した。

- 1) 原水（腐食抑制剤を添加していない水）を通した管には引張応力の有無にかかわらず孔食が発生していた。これに反して、循環水（腐食抑制剤を添加した水）を通した管には孔食の発生が全くみられなかつた。

2) 割れはA, B両製油所におけるいずれのテストにおいても、原水を通した管のうち引張応力を与えた管にのみ生じ、循環水を通した管には発生しなかった。すなわち、腐食抑制剤はアルミニウム黄銅の応力腐食割れを完全に抑制しうる場合があることがわかった。

3) 割れはすべて孔食部を通る位置かまたは変形帯の部分において円周方向に生じていた。このことから、孔食部または変形帯部などにおける応力集中作用の存在が応力腐食割れ発生における一要因であることが推察された。

4) 循環水に添加されていた腐食抑制剤はクロム酸塩および重合リン酸塩の二者の混合物であるので、以上のテス

トでみられた効果が二者のうちいずれか一方によるものか、または両者の複合作用によるものかは明確ではなかった。

なお、本稿を終えるにあたって、本研究の実施に際して絶大な御支援を賜った日本石油㈱本社石井正義氏、日本石油精製㈱根岸製油所木口俊夫氏ならびに日本石油㈱新潟製油所鈴木顕侑氏に厚く感謝致します。

文 献

- 1) 下平三郎, 佐藤武明: 本誌, 1(1960), 79
- 2) 佐藤史郎: 本誌, 4(1963), 56
- 3) 平松剛毅, 野中正浩: 神戸製鋼技報, 17(1967), 40
- 4) 村上陽太郎, 猪飼靖: 伸銅技術研究会誌, 6(1966), 102

R119

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 10 No. 3 July 1969

銅および銅合金ローフィン管の渦流探傷検査法

廣沢栄一
鷲田理雄

住友軽金属工業株式会社

銅および銅合金ローフィン管の渦流探傷検査法

廣沢 栄一* 鷺田 理雄**

1. はじめに

銅および銅合金ローフィン管は熱伝達性を向上させるために、転造によりフィン付加工を行ない、その外表面積を平滑管の2~3倍としたもので、その大きな特長はフィンと管が一体となっていることである。したがって熱伝達性はもちろんのことであるが、耐久性・経済性においても優れており、取扱いの容易さも伴なって、熱交換器用管として広く用いられている。

フィン付加工は一般に冷間転造によって行なわれている。この場合加工前の平滑管（以下、原管と呼ぶ）の顕微鏡的な欠陥あるいはわずかな加工条件の狂いにより厳しい加工を受けるフィン部に割れが発生することがある。¹⁾ ASTM B359-66a では銅および銅合金ローフィン管の欠陥検査として気密試験を規定している。そして実際には気密試験に目視検査を併用しているわけであるが、欠陥検査として充分とはいえない。すなわち気密試験では貫通欠陥のみしかわからず、目視検査ではフィンがあるため欠陥を発見にくく、見出したとしても、その深さを推定するのには困難である。そこでローフィン管の品質保証の一手段として渦流探傷検査の適用を検討した。

ローフィン管に渦流探傷を適用するには検出コイルの構造により種々の方法が考えられるが、ボビン型検出コイルを用いる検査法を検討した結果、欠陥の検出ならびにその深さを推定するという所期の目的を達成することができた。そして本検査法をローフィン管の検査工程に導入した。

2. 渦流探傷検査

渦流探傷検査は電磁誘導探傷検査とも呼ばれ、その高感度性および使用の簡便さのため、最近になって広く用いられ始めた非破壊検査法である。

2.1 特長

- (1) 冶金学的性質の変化および形状の変化に敏感である。
- (2) 表面に現れていない内部欠陥も検出することができる。
- (3) 非接触で検査することができるため被検査材に傷をつけない。

* 研究部

** 技術部

- (4) 同一断面形状で軸方向に長い製品の検査に適している。（管棒製品の場合は有利である。）
- (5) 非磁性金属製品の場合、その適用が簡単である。
- (6) 検査速度が速く、全数検査が可能である。
- (7) 検出部が小形であるため、製造工程中に組込みやすい。
- (8) 検査の自動化が容易である。
- (9) 検査装置が比較的安価である。

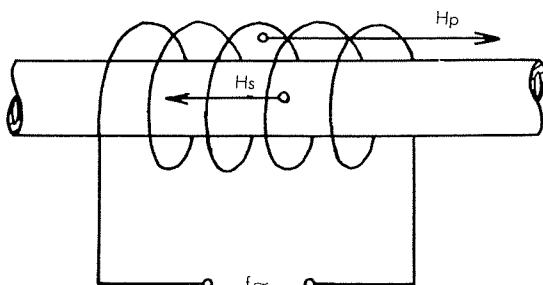
2.2 渦流試験法の基本原理

一例として円筒状試料の場合について渦流試験法の原理を簡単に述べる。図1にその原理図を示す。

交流電流を通じたコイルに試料を近づけると、コイルにより生じた交流磁場 H_p を介して、試料に渦電流が誘起される。この渦電流の分布および強さは次に述べる諸因子の影響を受ける。

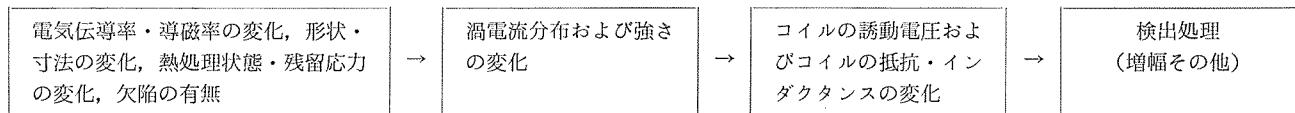
- (1) 交流磁場の強さおよびその周波数
- (2) 試料の電気伝導率および導磁率
- (3) 試料の熱処理状態および残留応力
- (4) 試料の形状、寸法および欠陥の有無
- (5) コイルに対する試料の充填率（〔試料の外径/コイル内径〕²）

この渦電流により生ずる二次的な磁場 H_s は図1に示すように H_p に対して方向が反対であり、これを減少させる方向に働く。したがって渦電流が最初の交流に対し、ある種の抵抗として作用することになり、渦電流の挙動がコイルの端電圧の変化として現れる。このコイルの端電圧の変化を電気回路的に処理して検出する方法が渦流試験法であり、この関係を図2に示す。



H_p : コイルによる磁場
 H_s : 試料の渦電流による磁場
 f : 周波数

第1図 渦流試験法（円筒状試料）



第2図 渦流試験法のブロック図

2.3 銅および銅合金管の検査

2.1項にも述べたように、渦流探傷検査は銅および銅合金管の検査に適している。そして渦流探傷検査を銅および銅合金管の製造工程中に組込み、自動化も進め、有力な品質保証の一手段として活用している。検査基準としてはASTM E243-67T²⁾とほぼ一致した基準を定めて検査を行なっている。

3. ローフィン管の渦流探傷検査法

検出コイルの構造およびその被検査管に対する相対的な移動方向により、次に示す3種類の方法(図3参照)が考えられる。

- (a) 貫通型検出コイルを用いる方法
- (b) ポビン型検出コイルを用いる方法
- (c) プローブ型検出コイルを用いる方法

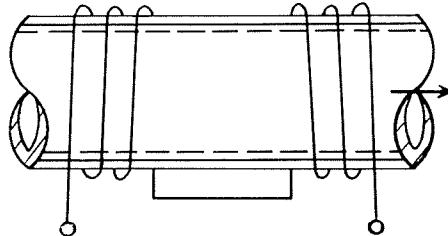
上記3種類の一般的得失は表1のようであり、実用化の難易度、検査の能率性、軟質材の検査においてもフィンの破損の少ない検査法であること、および肉厚部に内在する欠陥は完全に検出し得る検査法であること等に主眼点において、ポビン型検出コイルを用いる方法を採用した。

4. ポビン型検出コイルを用いたローフィン管の渦流探傷検査法

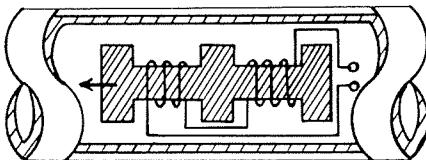
4.1 検査装置

4.1.1 渦流探傷器

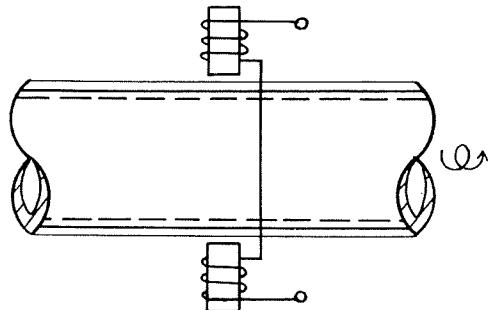
多種類の検査周波数を有し、優れた位相弁別回路を備えていることを重点において、表2に示す2器種(写真1参照)を選定した。



(a) 貫通型検出コイルを用いる方法



(b) ポビン型検出コイルを用いる方法



(c) プローブ型検出コイルを用いる方法

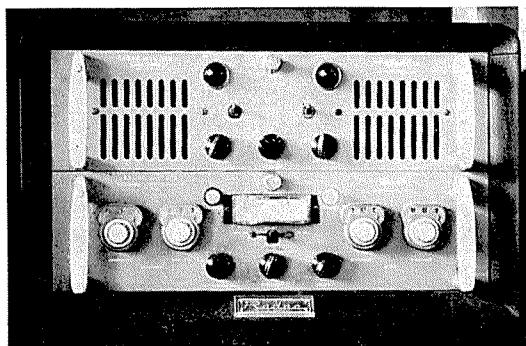
第3図 ローフィン管の渦流探傷検査法の種類

第1表 ローフィン管の種々の渦流探傷法の一般的得失

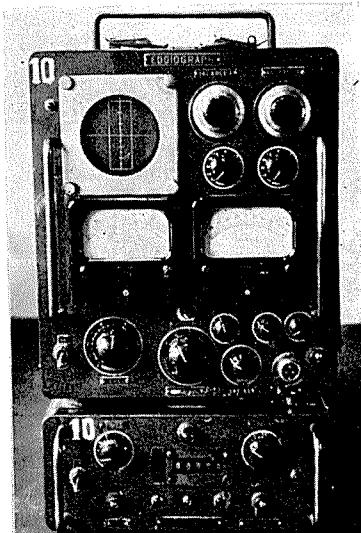
方 法	(a) 貫通型検出コイル を用いる方法	(b) ポビン型検出コイル を用いる方法	(c) プローブ型検出コイル を用いる方法
検査速度	速い	速い	遅い
端部不感域	有り	有り	極小
検査の自動化	容易	困難	容易
実用化	容易	容易	困難
フィン付加工機との直結	容易	困難	容易
フィン部の欠陥	検出容易	検出困難	検出容易
肉厚部の欠陥	検出困難	検出容易	検出困難
ローフィン管の移動	必要	不要	必要

第2表 ローフィン管検査用渦流探傷器

探 傷 器	Radac 302型	FD 103型
製 作 者	Budd 社(米国)	原電子測器K.K.(日本)
検査周波数(kHz) <当社所有のもの>	1, 16	1, 4, 16, 32, 64



(a) Radac 302型渦流探傷器 (Budd 社製)



(b) FD 103型渦流探傷器 (原電子測器 K.K. 製)

写真1 ローフィン管検査用渦流探傷器外観

4・1・2 検出コイル

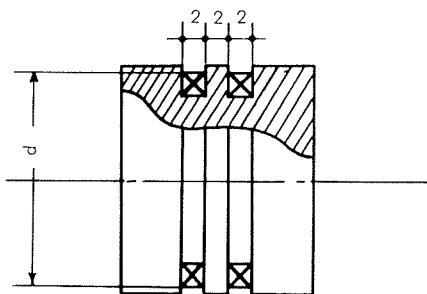
フィン付加工割れ欠陥は比較的シャープなものが多いため、検出コイル幅をせまくする必要がある。またボビン型コイルの場合リフト・オフ効果が大きくなるため自己比較法とし、検出コイル間隔を同様にせまくしなければならない。以上の2点と探傷器との合致性を考えて図4に示す検出コイルを製作した。なお検出コイル外径は被検査管の内径によって変ってくるが、充填率〔コイル外径 / 管内径〕²をできるだけ高くとる必要がある。

4・1・3 検出コイル駆動装置

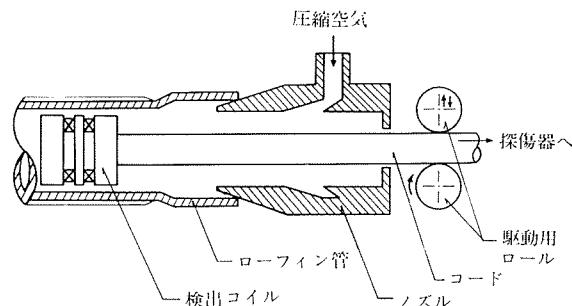
渦流探傷検査を検査工程の一方法とするためには、高能率、高信頼性が要求される。この場合検出コイルの移動がなめらかに行なわれないと、出力信号の信頼性が小さくなるとともに誤信号の原因ともなる。そこで図5に示すような検出コイル駆動装置を採用した。この装置を用いることにより、標準検査速度を60m/minに上げ得た。この場合の端部不感域は50mmである。写真2ではローフィン管の渦流探傷検査作業を示す。

4・2 検査周波数

ローフィン管を検査する場合、フィン部の形状の効果、リフト・オフ効果およびフィン付加工による残留応力効果を抑制しなければならない。これらの効果の抑制は位相弁



第4図 検出コイル（ボビン型）



第5図 検出コイル駆動装置

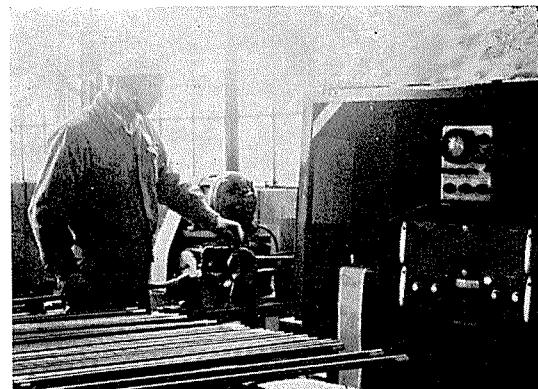


写真2 ローフィン管の渦流探傷検査作業

別によって行なうので、それに有利な周波数を選定する必要がある。位相弁別の難易度を判定するには試料のみによって定まる特性周波数 f_g （単位 Hz）なる考え方を用いる。厚肉（被検査材の材質・検査周波数を考慮する）円筒状試料³⁾を内面側から検査する場合の f_g は(1)式で示される。

$$f_g = \frac{5066\rho}{\mu_s D_i^2} \dots\dots (1)$$

ρ : 試料の固有抵抗 μ ohm-cm

μ_s : 試料の比導磁率

D_i : 試料の内径 mm

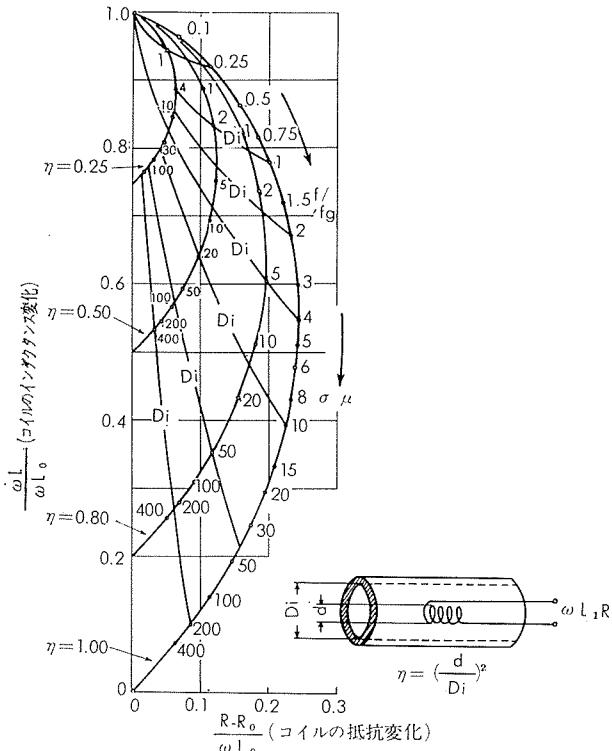
さらにインピーダンス軌跡より判断して、 f_g に対する検査周波数 f の比、すなわち f/f_g が(2)式の値となるとき、位相弁別が最も有利であると同時に欠陥検出能力が最大となる。

$$f/f_g = 1.5 \sim 12 \dots\dots (2)$$

次に各材質、各周波数における f/f_g の値を表3に示すが、この値を周波数選定の目安とした。また参考のために厚肉円筒状試料の場合のインピーダンス軌跡を図6に示す。

第3表 f/f_g の計算値

材質	ローフィン管寸法 内径 D_i (mm)	電気伝導率 σ (IACS%)	固有抵抗 ρ μohm/cm	比導磁率 μ_s	特性周波数 f_g (Hz)	周波数比 f/f_g					
						周波数 (kHz)					
						1	4	16	32	64	
焼脱酸銅	14.10	85	2.03	1	52	19	77	308	615	1231	
アルミニウム黄銅	13.40	23	7.5	1	212	5	19	75	151	302	
アルブラック	13.40	20	8.6	1	243	4	16	66	132	264	
10%キュプロニッケル	14.10	9.1	19.0	1	484	2	8	33	66	132	
30%キュプロニッケル	14.10	4.6	37.5	1	956	1	4	17	33	67	

第6図 インピーダンス軌跡³⁾ (円筒状試料)

検査周波数の選定にあたって、もう一つ注意しなければならないのは渦電流の浸透深さ δ である。この δ を適当に選ぶことにより、欠陥検出能力および欠陥の大きさと指示値の相関が向上することになる。 δ は均一な交流磁場中にある半無限平面導体における渦電流密度が表面における値の $1/e$ に低下するところまでの深さと定義され、(3)式で表わされる。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad \dots \dots (3)$$

f : 検査周波数

σ : 試料の電気伝導度

μ : 試料の導磁率

δ の各材質、各周波数についての計算値を表4に示す。

さらに δ は交流磁場の均一性によっても変ってくる。図4に示すように今回の試験に使用する励磁コイル幅は比較的せまいため実際には δ の計算値より浅くなると予想される。したがって今回の試験では δ をローフィン管の肉厚相当またはそれ以上ということを目安とした。以上位相弁別の難易度(表3参照)、渦電流浸透深さ(表4参照)および

第4表 渦電流浸透深さ δ の計算値(半無限平面導体の場合)

材質	ローフィン管寸法 内径 D_i (mm)	電気伝導率 σ (IACS%)	固有抵抗 ρ μohm/cm	導磁率 μ H/cm	$\delta \sqrt{f}$ $\times 10^{-9}$	渦電流浸透深さ σ (mm)					
						周波数 (kHz)					
						1	4	16	32	64	
焼脱酸銅	1.3×0.89	85	2.03	1	7.2	2.3	1.1	0.6	0.4	0.3	
アルミニウム黄銅	1.3×1.24	23	7.5	1	13.8	4.4	2.2	1.1	0.8	0.6	
アルブラック	1.3×1.24	20	8.6	1	14.8	4.7	2.3	1.2	0.8	0.6	
10%キュプロニッケル	1.3×0.89	9.1	19.0	1	21.9	6.9	3.5	1.7	1.2	0.9	
30%キュプロニッケル	1.3×0.89	4.6	37.5	1	30.8	9.8	4.9	2.4	1.7	1.2	

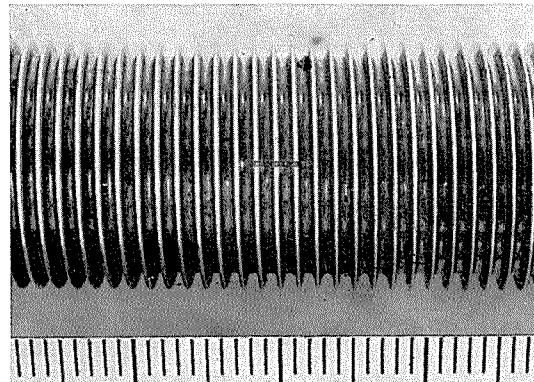
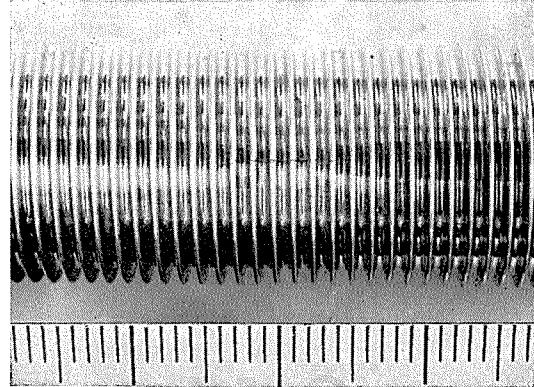
第5表 最適周波数および試験周波数

ローフィン管材質	最適検査周波数 (kHz)	試験周波数 (kHz)
焼脱酸銅	1	1
アルミニウム黄銅	1 ~ 4	
アルブラック		16
10%キュプロニッケル	4 ~ 16	
30%キュプロニッケル		

使用探傷器で選択し得る周波数より表5のとおり試験周波数を選定して試験を進めた。

4・3 標準試験片

フィン谷底まで進行している欠陥を標準に考え、その深さがフィン谷底までの u ノッチ傷を放電加工により製作し、それを標準試験片とした。表6に代表的ローフィン管の場合の u ノッチ傷の寸法を示す。また写真3に u ノッチ傷、およびフィン付加工割れ欠陥の外観写真を示した。

(a) u ノッチ傷 (放電加工による)

(b) フィン付加工割れ欠陥

写真3 u ノッチ傷およびフィン付加工割れ欠陥外観

第6表 標準試験片 u ノッチ傷主要部寸法

深さ	フィン谷底まで (1.3mm)
幅	(0.5mm)
長さ	フィン 3枚 (4mm)
方向	管軸 方向

第7表 ローフィン管の渦流探傷検査条件

ローフィン管材質	銅	黄銅	キューブロニッケル
探傷器	Radac 302型 あるいは FD103型		
検査周波数	1kHz	16kHz	
検出コイル	ボビン型コイル		
検査速度	60m/min		
端部不感域	50mm		

4・4 試験結果および考察

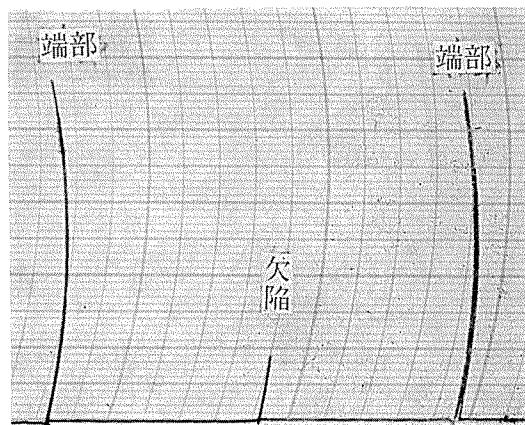
表7に試験条件および本検査法の特性の一部をまとめて示す。本検査法の目的はフィン付加工による欠陥の検出ならびにそれらの欠陥の深さを推定することであるが、そのために、検査結果をペン書きオシログラフで記録し、その指示値と欠陥の深さとの対応を試みた。なお欠陥の深さは欠陥の中央部の断面を工具顕微鏡で観察して求めた。次に一例としてアルブラック・ローフィン管の場合のペン書きオシログラフの記録とそれに対応する欠陥の断面写真を写真4に示した。次に図7に燐脱酸銅・ローフィン管、アルブラック・ローフィン管および10%キューブロニッケル・ローフィン管の場合の記録計指示値と欠陥の深さの関係を掲げた。図7からわかるように記録計指示値と欠陥深さの間には比較的良好な相関が得られている。そこで実際の検査は記録計指示値より図7によって欠陥の深さを推定し、良否の判定を行なっている。

なお、端部不感域の問題であるが、ボビン型コイルで検査を行なう限り避けられない問題である。しかし端部はフィン付加工の初まりおよび終りの部分であるため加工度も少なく、欠陥の発生する確率が小さいため現実には問題となっていない。渦流探傷検査の導入により目視検査は廃止したが、気密試験は上記の端部不感域の問題および、ASTM B359-66aの規格の関係で実施している。

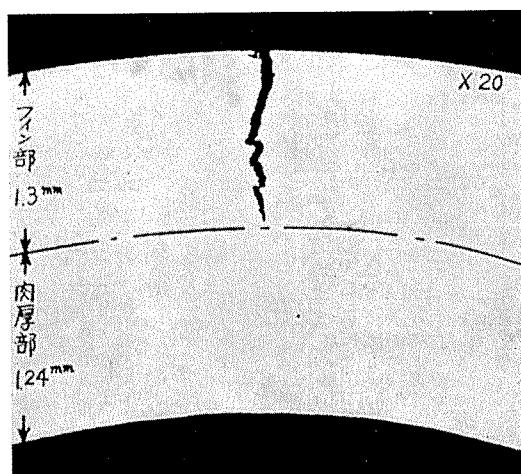
5. 結び

ローフィン管の渦流探傷検査法としてボビン型検出コイルを用いた方法で所期の目的を達成し得た。そして本検査法はローフィン管の品質管理の一手段として活用されているのみならず、フィン付加工技術向上のための貴重なデータを提供しているといえる。

当初の段階においてはローフィン管の渦流探傷検査はフィンの形状効果のため実用化は困難であろうと予想したが、本報告に示すように比較的良好な結果が得られたので、次の段階として、プローブ型検出コイルを用いる方法を考えている。この方法は3項でも述べたように、不感部が少くなり、フィン付加工機に直結して、完全自動で検査できる利点がある。したがって、この方法についてもさらに検討を加えたい。



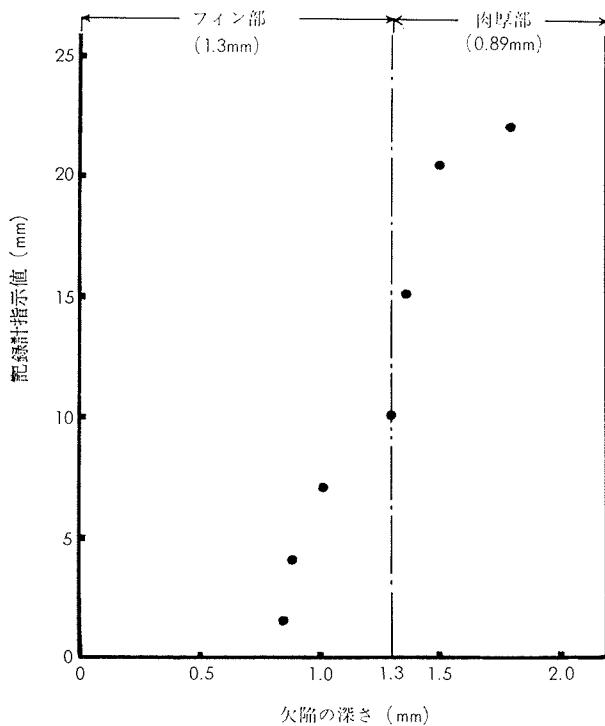
(a) ペン書きオシログラフの記録



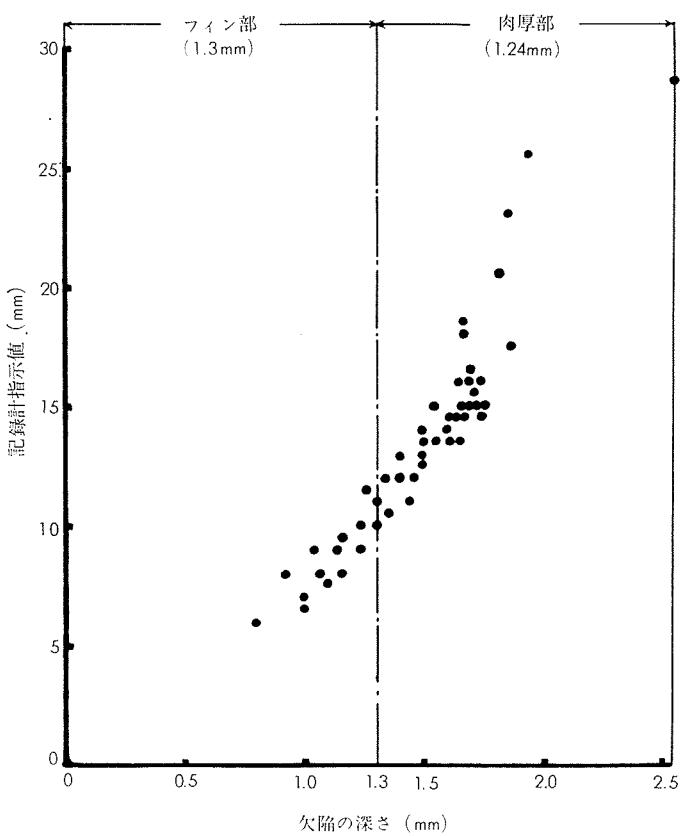
(b) フィン付け加工割欠陥

(1) アルブラッククローフィン管 18.48φ×1.3fh×1.24t

写真4 ローフィン管のペン書きオシログラフの記録と欠陥断面写真の一例

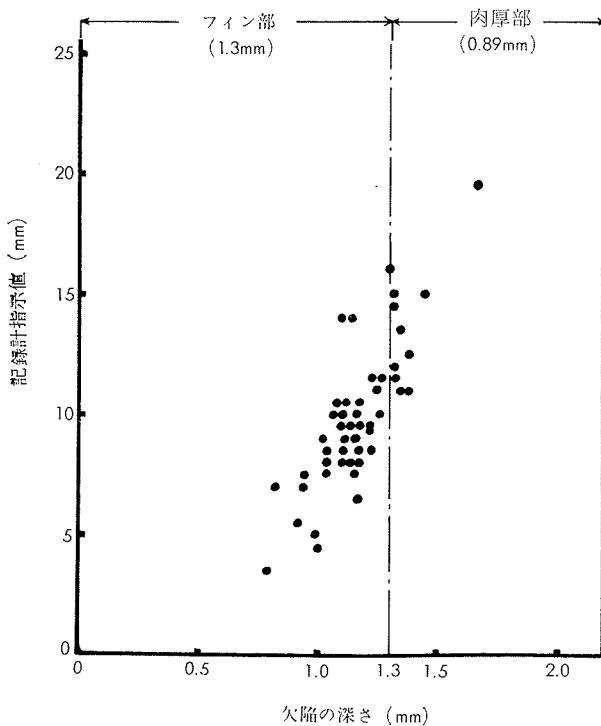


- (1) 被検査管: 焼脱酸銅・ローフィン管
 $18.48\phi \times 1.3fh \times 0.89t \times \ell$
- (2) 使用探傷器: FD103型
- (3) 検査周波数: 1kHz
- (4) 欠陥の種類: 放電加工によるuノッチ欠陥
- (5) 感度設定: 標準試験片人工欠陥からの指示値を10mmに設定



- (1) 被検査管: アルブラック・ローフィン管
 $18.48\phi \times 1.3fh \times 1.24t \times \ell$
- (2) 使用探傷器: Radac302型
- (3) 検査周波数: 16kHz
- (4) 欠陥の種類: フィン付加工割れ欠陥
- (5) 感度設定: 標準試験片人工欠陥からの指示値を10mmに設定

第7図 記録計指示値と欠深さの関係



- (1) 被検査管: 10%キュプロニッケル・ローフィン管
 $18.48\phi \times 1.3fh \times 0.89t \times \ell$
- (2) 使用探傷器: Radac302型
- (3) 検査周波数: 16kHz
- (4) 欠陥の種類: フィン付加工割れ欠陥
- (5) 感度設定: 標準試験片人工欠陥からの指示値を10mmに設定

文 献

- 1) ASTM B359-66a: Standard Specification for Copper and Copper-Alloy Seamless Condenser and Heat Exchanger Tubes with Integral Fins
- 2) ASTM E243-67T: Tentative Recommended Practice for Electromagnetic (Eddy Current) Testing of Seamless Copper and Copper-Alloy Heat Exchanger and Condenser Tubes
- 3) Robert C. McMaster: Nondestructive Testing Handbook, Society for Nondestructive Testing Vol. II, (1959)
- 4) ASTM E268-65T: Tentative Definitions of Terms Relating to Electromagnetic Testing
- 5) Radac Model 302 Operating Manual, The Budd Co.

R120

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 10 No. 3 July 1969

アルミニウム合金製高欄について

藤 田 正
菊 地 昭 雄
本 間 壮 介

住友軽金属工業株式会社

アルミニウム合金製高欄について*

藤田 正** 菊地 昭雄** 本間 壮介**

1. はじめに

経済の急速な膨脹と交通の発達に伴う自動車の著しい普及は、国土の狭さなど制約条件が多いため交通量の点から橋梁、市街地高架橋および高速道路の必要性が最近ますます増加している。このため毎年莫大な額の投資が道路建設にむけられ、それに伴って必然的に新しい工法、新しい道路資材が生み出されている。この新しい道路資材のひとつとして最近注目されているものがアルミニウム合金製高欄である。

アルミニウム合金製高欄は外観から受ける現代的感覚と美しさ、耐食性の見地から橋梁に、また高速道路の防護柵などに最近大幅に採用されており、従来一般に使用されていた鋼製のものとくらべると次の特長をもつ。

1) 耐食性がすぐれたアルミニウム合金を使用しているので、保守が非常に楽であり、塗装や塗替えが不要である。しかも自動車等の事故による補修も容易に行なえる。

2) 任意の断面形状のものが得られる。すなわち、「設置環境に応じた高欄を」という要望に対してデザイン的にすぐれたものを提供できる。

3) 鋼製のものとくらべて重量がおよそ $\frac{1}{2}$ であり、施工・運搬などの作業性が良い。

しかし、鋼製高欄とくらべて値段が若干高いということも事実であり、われわれは設計にあたり材料の選定、強度上有効な断面形状などについて検討を十分に加えて御要望を満すよう努力しているしたいである。

本資料は当社で製作販売しているアルミニウム合金製高欄の種類と仕様を紹介し、さらに最近高速道路に防護柵としても使用されるようになったSK100番タイプ高欄について二、三の静的および動的強度実験を行なった結果もあわせてのべる。

2. アルミニウム合金製高欄の種類と仕様

2.1 アルミニウム合金製高欄の種類

一般に使用されているアルミニウム合金製高欄を大別すると、次の3種類となる。

1) パイプレーリング形：

ポストにパイプを結合したもの（写真1参照）。

2) ぬき木形：

笠木と平行にぬき木を数本通したもの（写真2参照）。

3) バラスタ形：

笠木に縦方向のバラスタを配したもの（写真3参照）。

* 昭和44年1月24日アルミニウム建築研究会第7回研究発表会（於東京、第1証券ホール）にて一部発表

** 開発部

高欄は周囲の景観、交通事情、橋梁の形式などによってそれに適した形状のものがえらばれるわけであり、写真4～6にその一例を示す。

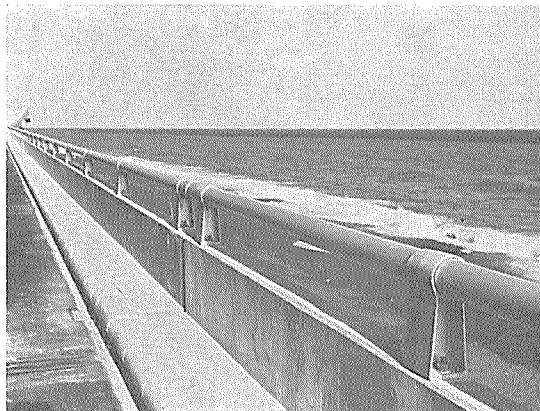


写真1 西湘バイパス SK-111型

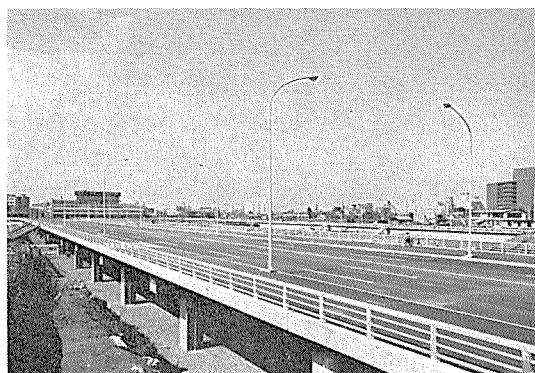


写真2 新宿副都心 SK-4100型

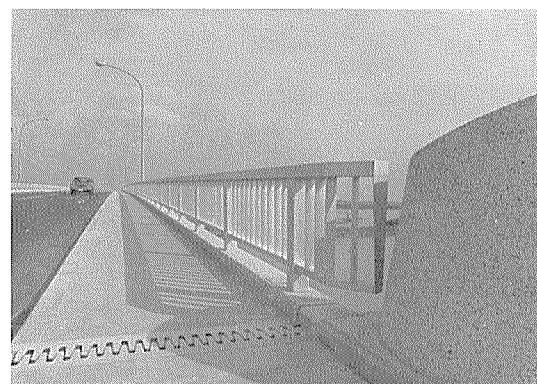


写真3 棚尾橋 SK-2430型

2.2 SK型高欄の仕様

2.2.1 標準仕様

当社のアルミニウム合金製高欄の標準図を第1図（SK-101型）、第2図（SK-201型）、第3図（SK-301型）、および第4図（SK-2470型）に示し、第5図はそれらのポストの間隔を示す。

主部部材の引張性質と用途例は第1表に掲げた。

2・2・2 高欄の設計強度

高欄の設計はアルミニウム合金製の場合も鋼道路橋設計示方書第74条第3項、「高欄にはその側面に直角に250kg/mの推力が頂上に働くものとして設計すること」にもとづいている。

推力250kg/mとは、群衆が高欄のレールに寄りかかっただ場合、レール方向に水平に作用するとみなされる荷重である。負荷状態を第6図に、強度計算例を第2表に示す。

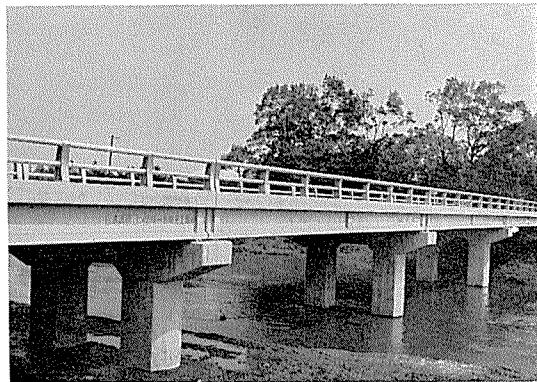


写真4 根金橋 SK-201型

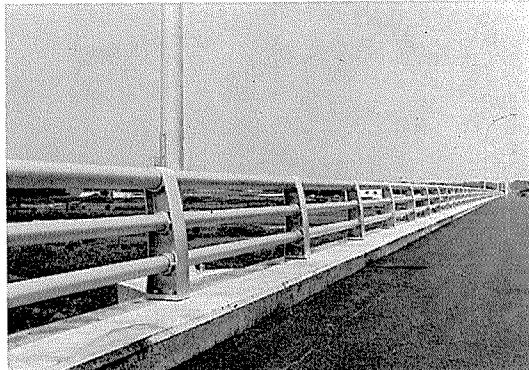


写真5 戸沢橋 SK-301型

第1表 主要部材の引張性質と使用例

材質		引張性質			使用例
		引張強さ (kg/mm²)	耐力 (kg/mm²)	伸び (%)	
アルミニウム合金薄物 7種A	AC7A-F	JIS 保証値 代表値	15.0 — 16.0	— 7.0	ポスト
	A2T4-T6	JIS 保証値 代表値	27.0 31.6	24.0 28.1	
耐食アルミニウム合金 4種目無管	A2S5-T5	JIS 保証値 代表値	15.0 19.0	10.0 14.8	レール
	ZG43-T5	JIS 保証値 代表値	33.0 34.6	2.0 27.8	
溶接構造用アルミニウム合金押出形材					レール

3. 強度試験

3・1 供試高欄

供試高欄はSK-101型（第1図参照）、SK-103型（第7図参照）およびSK-1710型（第8図参照）の3種類であり、SK-101型とSK-1710型は静的曲げ試験に、他は衝撃試験にそれぞれ供した。ポストの材質はAC7A-F、その間隔は曲げ試験の場合2m、衝撃試験では3mとした。レールはSK-101と103型の場合がSG10-T6管材（Alcan B51SでA2T4-T6相当）、SK-1710型では

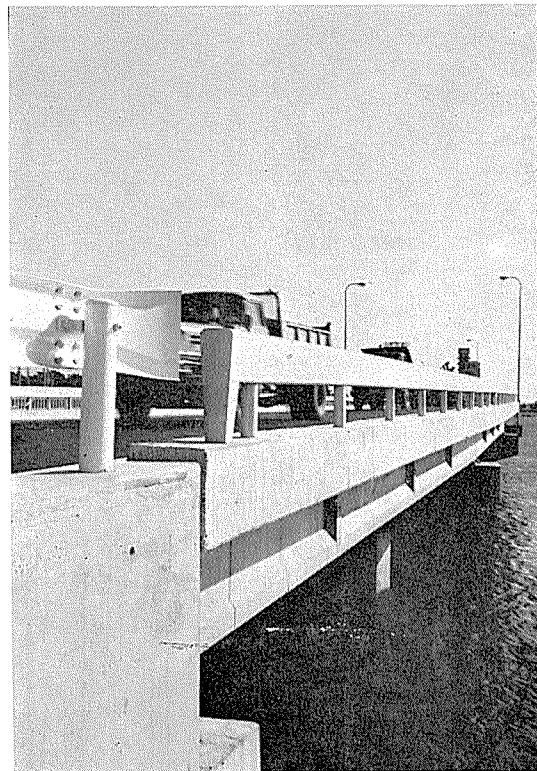


写真6 SK-1510型

第2表 強度計算結果

	SK-301型		SK-2420		
	レール	ポスト	レール	ポスト	パラスタ
使用材質	A2T4-T9	AC7A-F	ZG43-T5	A2S5-T5	
短応引張圧縮曲げ(kg/cm²)	2160	850	2500	2500	1000
許セイ断密度(kg/cm²)	1250	490	1440	1440	580
断面2次モーメントI(cm⁴)	166	3265	375	440	18.5
性能面係数Z(cm³)	30.2	297	53.6	80	6.2
最大曲げモーメントM(kg·m)	195	466	195	682	19.1
最大曲げ応力シートσ(kg/cm²)	646	157	364	853	320
安全率n	3.3	5.4	6.9	2.2	3.2

ZK60-T5押出形材である。各部材の引張性質を第3表に示す。

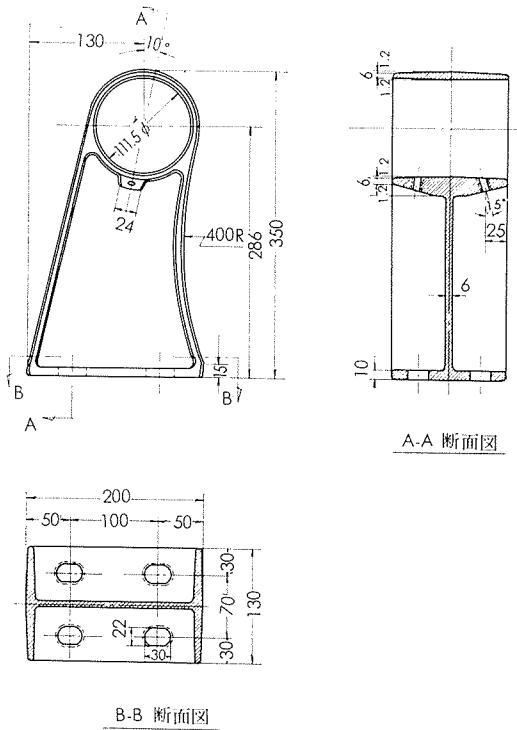
3・2 静的曲げ試験

3・2・1 強度計算

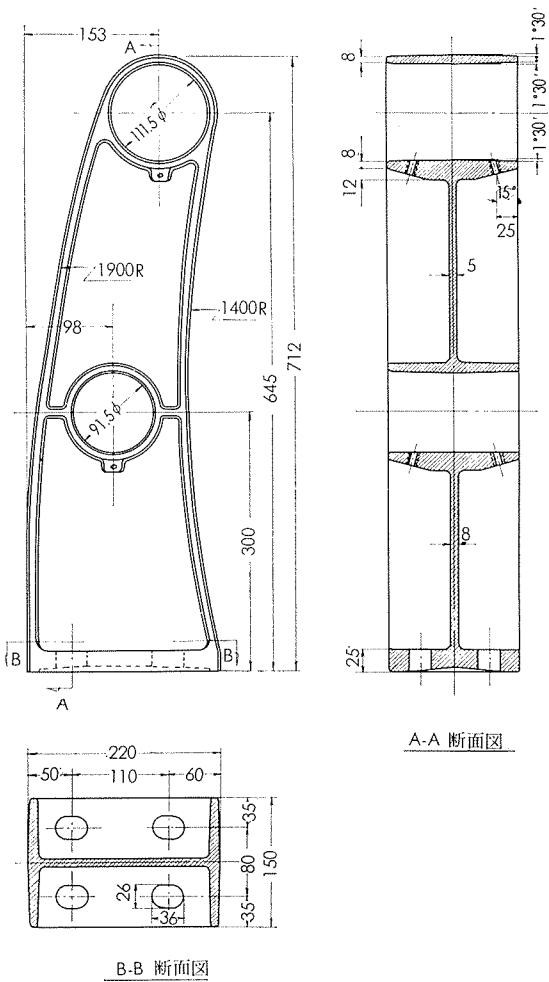
ポスト間隔 $l = 2\text{ m}$ とし、両端支持で等分布荷重（推力 $w = 250\text{ kg/m}$ と 750 kg/m ）および中央集中荷重（最大応力が耐力となる場合）がそれぞれ負荷されるとみなした場合のレールの諸性質と応力 σ 、たわみを第4表に示す。

第9図は両レールの曲げモーメント M に対する応力比 $\alpha = \sigma/M$ の計算結果を図示したものである。すなわち、最大応力 σ_{max} が生ずるのはSK-101型レールでは負荷方向であり、SK-1710型ではそれに対して $5^{\circ}30'$ 傾いた方向である。

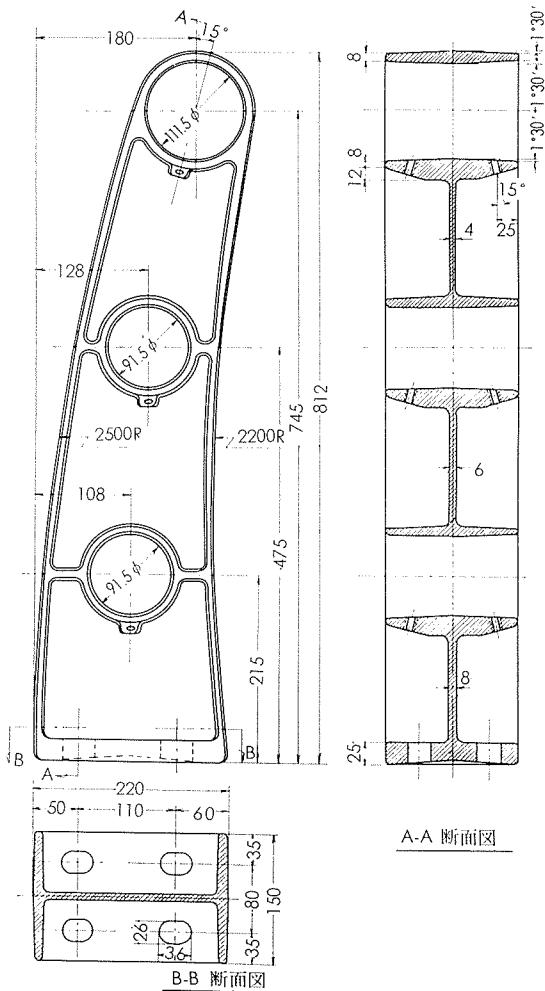
これらの結果からみるとレールの耐力に対する安全率 n はSK-1710型が $n=7.3$ 、SK-101型では $n=6.6$ である。



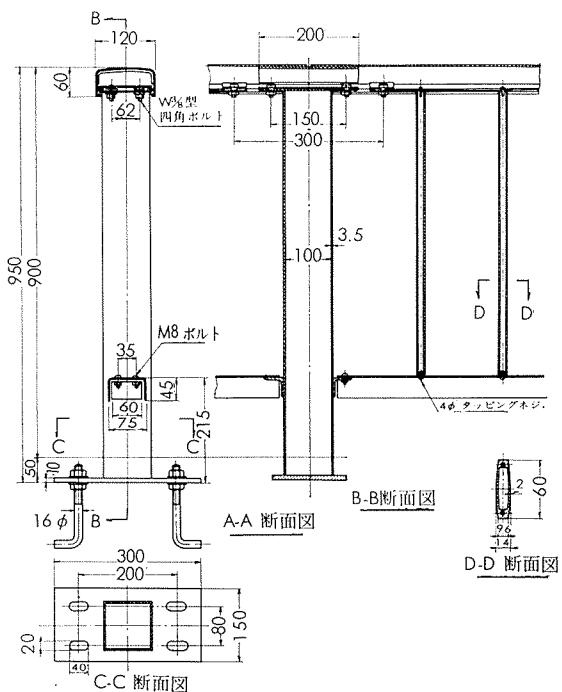
第1図 SK-101型



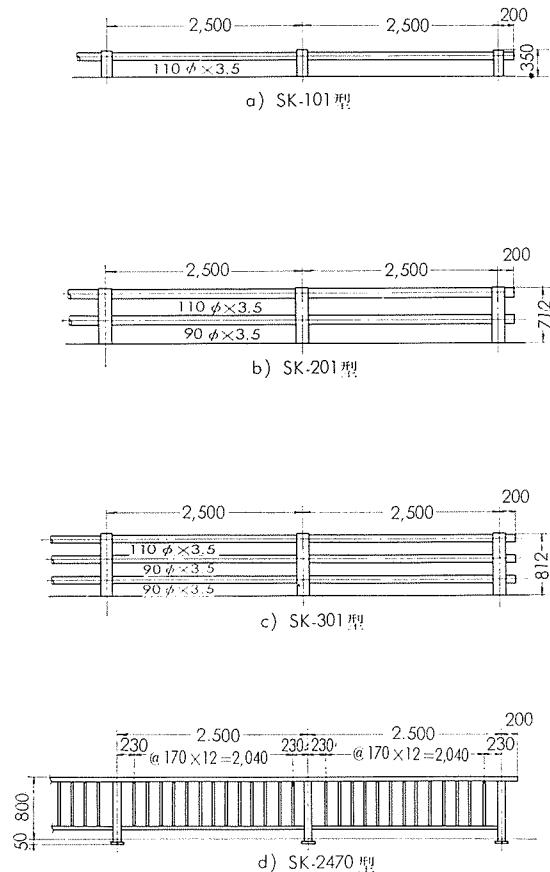
第2図 SK-201型



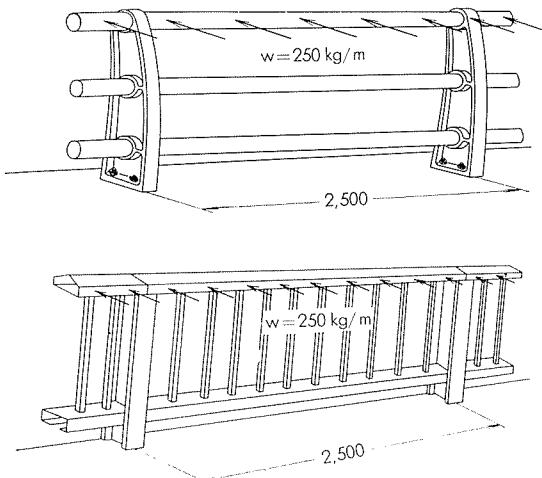
第3図 SK-301型



第4図 SK-2470型



第5図 一般側面図



第6図 負荷状態

ポストは地覆に固定されるので、その曲げ応力は $\sigma = 3.33w$ となり $w = 0.25 \text{ kg/mm}$ の場合 $\sigma = 0.83 \text{ kg/mm}^2$ である。したがって第2表からみると引張強さに対する安全率は約29である。いっぽうにおいて、各ポストはSS41鋼 $-\frac{3}{4}\phi$ のアンカーボルトに結合され、 $s = wl = 500 \text{ kg}$ のせん断力がかかる。鋼構造計算規準から短期許容面せん断力は 5.17Ton であるから安全率は約41となる。

3・2・2 試験方法

試験方法は第10図に示す。すなわち等分布荷重試験は荷

第3表 供試高欄部材の引張性質

部材	引張性質		
	耐力 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
ポスト	—	24.5	16
ZK60-T5	31.6	35.7	16
レール (AlcanB51S)	27.3	30.9	14
—	—	32.9	14

第4表 レールの諸性質と応力たわみ計算値

	S K1710	S K101
材質	ZK60-T5	S G10-T6
肉厚	3mm	3.5mm
断面積	1220mm ²	1170mm ²
断面2次モーメント	$I_1 = 2.023 \times 10^6 \text{ mm}^4 (-53^\circ)$ $I_2 = 1.319 \times 10^6 \text{ mm}^4 (34^\circ)$	$1.662 \times 10^6 \text{ mm}^4$
曲げモーメントによる応力	$+3.48 \times 10^{-5} M (-5^\circ - 30^\circ)$ $-3.37 \times 10^{-5} M (141^\circ - 30^\circ)$	$\pm 3.31 \times 10^{-5} M (0^\circ)$ (180°)
極大応力	$\frac{x}{l} = 3/8$ $+9.79w$ $-9.48w$	$\pm 9.31w$
表皮応力	$xl = 1$ $-1.74 \times 10w$ $+1.69 \times 10w$	$\mp 1.66 \times 10w$
等最大応力	$w = 0.25 \text{ kg/mm}$ -4.35 kg/mm^2 $+4.23 \text{ kg/mm}^2$	$\mp 4.15 \text{ kg/mm}^2$
分応力	$w = 0.75 \text{ kg/mm}$ -13.05 kg/mm^2 $+12.69 \text{ kg/mm}^2$	$\pm 12.45 \text{ kg/mm}^2$
布荷重	耐力荷重 安全率 7.28	1.82 kg/mm 1.64 kg/mm
最大たわみ	$xl = 0.422$ $5.42 \times 10^{-3} \frac{wl^4}{EI}$ $7.30w (-10^\circ)$ 1.83 mm 4.49 mm	$7.45w (0^\circ)$ 1.86 mm 5.58 mm
耐力たわみ	13.3 mm	12.2 mm
最大応力	$xl = 1/2$ $+1.41 \times 10^{-2} P$ $-1.37 \times 10^{-2} P$	$\pm 1.34 \times 10^{-2} P$
一スパン集中荷重	$xl = 1$ $-6.53 \times 10^{-3} P$ $+632 \times 10^{-3} P$	$\mp 6.21 \times 10^{-3} P$
耐力荷重	2.240 kg	2.040 kg
最大たわみ	$xl = 0.480$ $1.50 \times 10^{-2} \frac{P l^3}{EI}$ $1.012 \times 10^{-2} P$	$1.032 \times 10^{-2} P$
耐力たわみ	22.7 mm	21.1 mm

(注)()内の角度は図心荷重方向を基準にとった方向を示す。

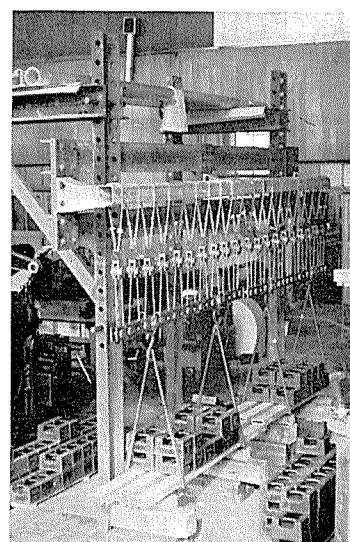
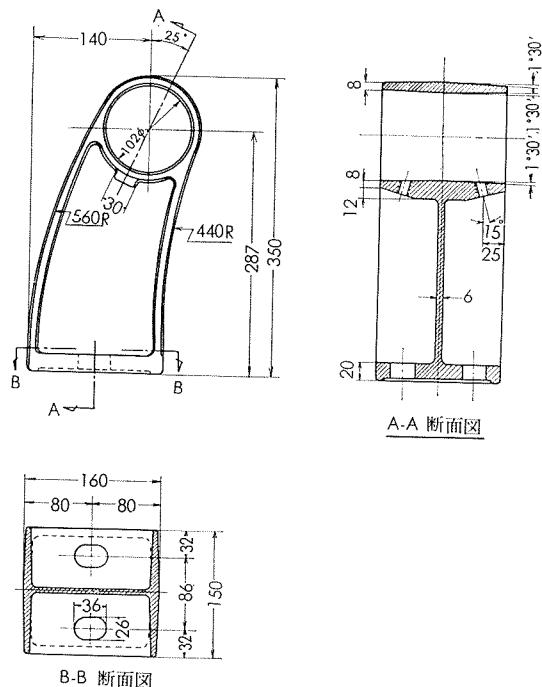
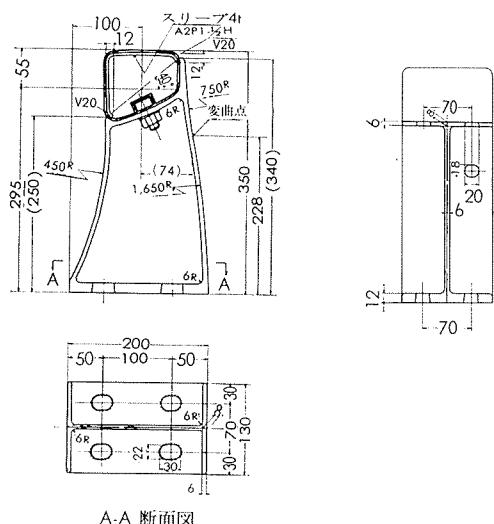


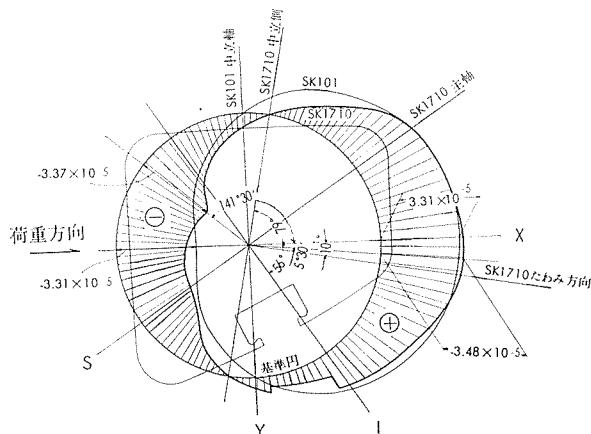
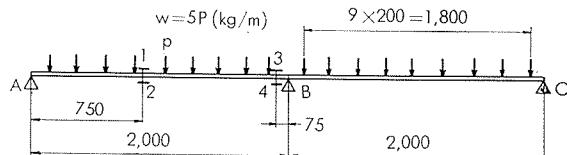
写真7 等分布荷重試験要領



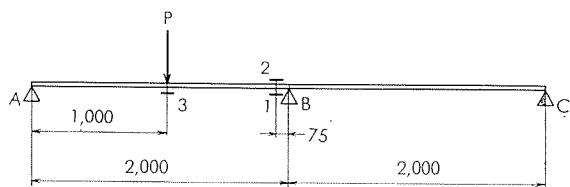
第7図 SK-103型



第8図 SK-1710型

第9図 レール表皮に生ずる応力比 $\alpha = \sigma / M [1/\text{mm}^3]$ 

等分布載荷試験



1スパン集中荷重試験

注：1桁の数字はゲージ測定位置を示す

第10図 静的試験要領

重分割装置（写真7参照、特許申請中）によって等分布載荷を設計荷重の3倍 $w=750\text{kg}/\text{m}$ まで、中央集中荷重試験（写真8参照）は座屈試験機を用いてレールが破壊するまでそれぞれ行なった。荷重点の変化はカセットメーターを用いて測定し、負荷は中央集中荷重試験の荷重点における局部変形を押えるため牛皮およびゴム板の上にフランジ幅100mmのI形鋼を交互に重ねて行なった。またひずみはストレーンゲージを用いて測定し、縦弾性係数 $E=7000\text{kg}/\text{mm}^2$ として応力を算出した。

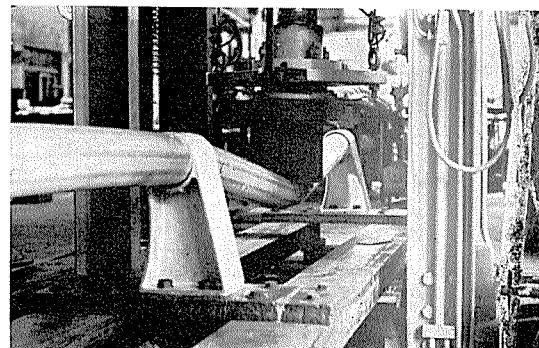
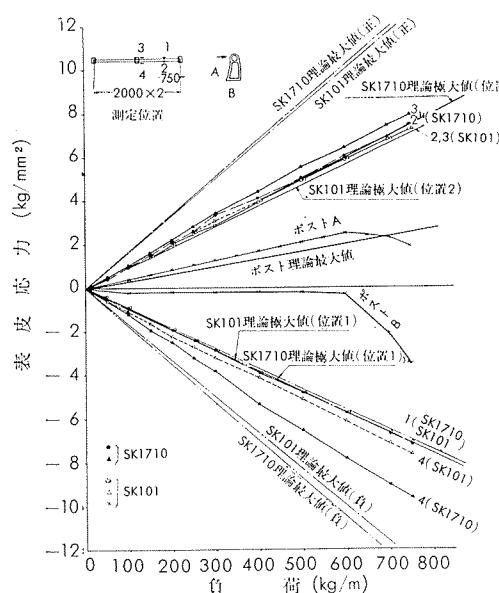


写真8 中央集中荷重試験要領

3・2・3 試験結果

等分布荷重試験結果を第11図に示す。 σ_{max} は第10図のポストB上のレールに生じて、計算値の約%であり、他の位置の σ は計算値とよく一致している。測定位置はいずれも第9図から同一断面上で σ_{max} を生ずる点を選び、次に σ_{max} が生ずるポストBに近いレールの位置No.1, 2と、1スパン上で極大応力を生ずる $x/l=3/8$ の位置（第3表参照）すなわちNo.3, 4で測定したわけである。前者の測定値が計算値と一致しないのはポストの幅75mmだけ測定位置がずれているのと、負荷によって生じた局部変形も若干関係があるのであろう。



第11図 等分布荷重試験結果

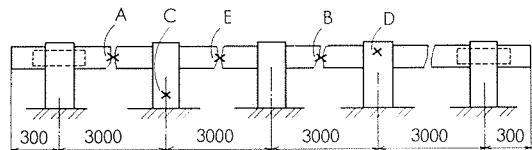
3・3 衝撃実験

3・3・1 実験方法

衝撃実験方法を第14図に示す。すなわち重錐を5Tonボールクレーンで所定の高さH(最高1m)まで持ち上げ、高欄のポストまたはレールに衝撃を与えるわけである。後述するように、高欄に要求されるエネルギーは1.6T-mであるから、重錐は $450\phi \times 1,100l$ 、重量 $W=1.560\text{kg}$ の鉄製丸棒を使用した。また重錐の長手方向をレールに当てるか、または側面を当てるかによって衝突時の状況が異なってくるが、衝撃エネルギーの計算には $E_{IMP}=WH$ を用いた。高欄に対する衝突位置は第15図に、衝突諸条件を第5表にそれぞれ示す。

ポストについての測定値は計算値とほぼ一致しており、許容応力度よりはるかに小さい。アンカーボルト締付附近は $w=600\text{kg}/\text{m}$ を越えると局部的に大きい応力を生ずる兆候がみられる。

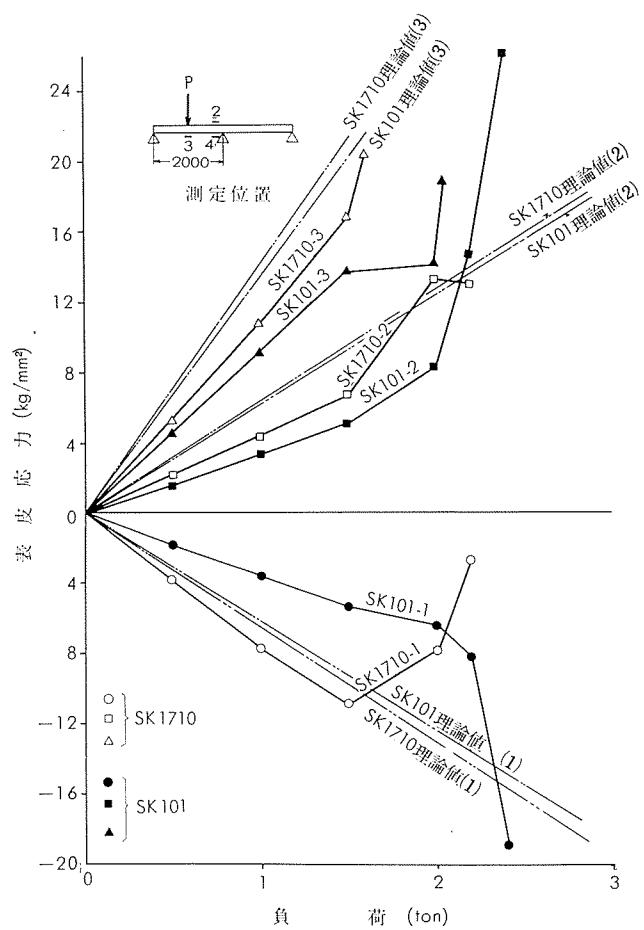
中央集中荷重試験結果は第12図に負荷一応力、第13図に荷重点変位を示す。前者の測定値は計算値の約7割であり、また荷重1,500kgを越えると局部変形の影響が顕著に現れる。



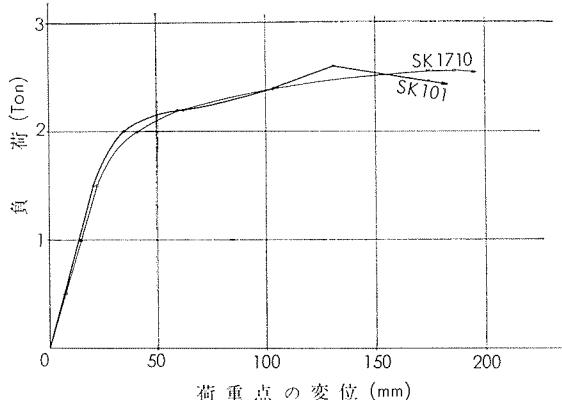
第15図 重錐衝突位置

第5表 実験条件

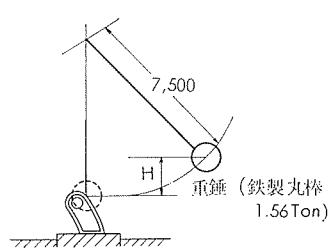
条 件	実験番号				
	No. 1	No. 2	No. 5	No. 3	No. 4
重錐の方向	側面	側面	長手方向	長手方向	長手方向
重錐の高さHm	0.7	1	1.05	0.9	0.85
衝突速度km/hr	13.3	15.9	16.3	15.1	14.7
衝撃エネルギーT-m	1.09	1.56	1.64	1.5	1.32
衝突場所	レール中央 A	レール中央 B	レールE	ポストC	ポストD



第12図 集中荷重試験結果



第13図 1スパン集中載荷時の負荷と変位の関係



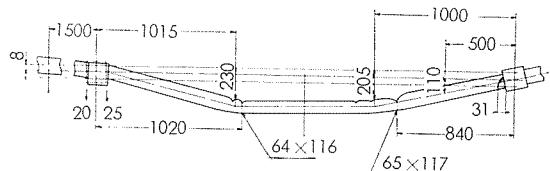
第14図 実験方法

3・3・2 実験結果 実験結果は第6表に示す。いずれの実験においてもレールの破断がおきず、ポストからの飛散もなく、 E_{IMP} はレールが大半吸収するが、ポストも一部吸収している。

第6表 高欄衝撃実験結果（重錘1.56 Ton）

実験 No.	1	2	5	3	4
重錘の方向	側面	側面	長手方向	長手方向	長手方向
衝撃エネルギー(T-m)	1.09	1.56	1.64	1.5	1.32
衝突位置	レール中央	レール中央	レール	ポスト	ポスト
最大たわみ(mm)	230	230	355	65ずれる	倒れた
変形状況	変形小 継手部レールが31mm ずれた。	継手部レールが36mm ずれた。	ポスト完全 破壊	ポスト完全 破壊	

レールの変形は最大衝撃エネルギー 1.6T-m (実験No.5)において衝撃方向に最大 355mm であるから、実際の吸收エネルギーはまだ相当高いものと考えられる。実験 No. 2 のレール変形状況を第16図、写真9にそれぞれ示す。



第16図 実験 NO. 2 レールの変形

レール継手部にはスリーブを挿入してあるため、衝撃を与えると 31mm (実験 No. 2), または 36mm (実験No.5)ほどそれぞれレールがポスト嵌合部からはずれたが、レールははずれなかった。すなわちスリーブを用いた効果が認められ、写真10は実験No.5におけるその状況を示す。またポストを介した次のレールへの衝撃の影響はレールが一体であれば認められるが、スリーブを介したときにはあまり影響がない。スリーブおよびレールとポストとの止めボルトは一部破断したが、スリーブの長さが適當であれば強度的には何等支障ないようである。

ポストは実験 No. 3 と 4 において直接衝撃のため破壊したが、その際にレールの損傷はおきなかった。ポストの破壊状況を写真11と12に示す。

3・3・3 エネルギ計算と考察 高速道路や中央分離帯に使用する高欄は防護柵として用いるため「防護柵設置要項」に規定される性能が要求される。そこで、「防護柵設置要項」の諸数値を用い、車両が50または60cm持ち上った場合その重心も同じ高さだけ持ち上ると仮定し、高欄に要求されるエネルギーを算出すると第7表のようになる。地覆と高欄が一体であるとみなせば、これは車両が地覆を乗り越えて落下するのを防止するため最小限必要なエネルギーとなる。



写真9 実験 NO. 2 レールの変形状況

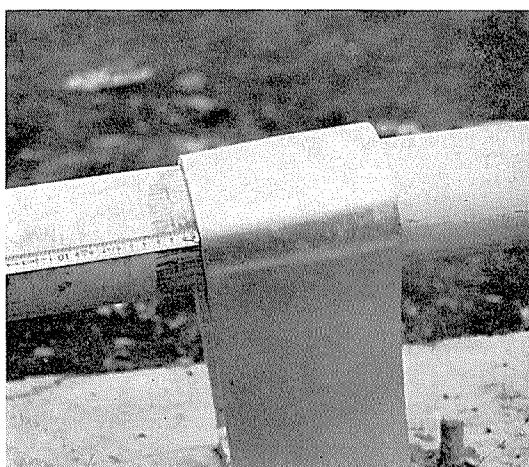


写真10 実験 NO. 5 レールの端部

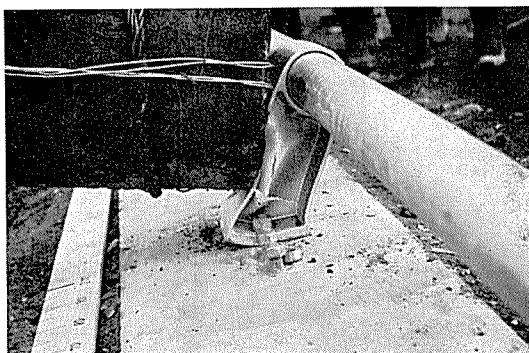


写真11 実験 NO. 3 ポスト破壊状況

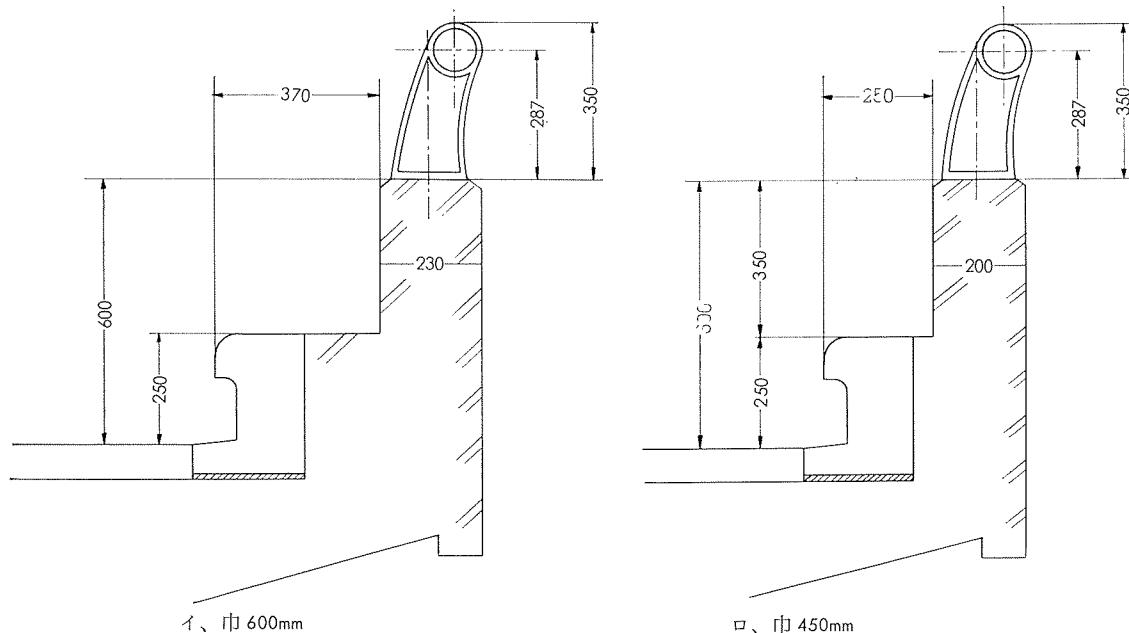


写真12 実験 NO. 4 ポスト破壊状況

そこで第17図に示す地覆に施工した高欄の吸収エネルギーを算出してみよう。「土木研究所資料第371号」から車輌前輪の片方が地覆に乗り上げた場合車輌前半が浮上るものとし、高欄に直角な速度成分は0.1secの間に約90%になるものとする。いっぽう、「自動車と道路」22(1968)No.4から車輌の衝突角度は15°であり、「防護柵設置要項」種別Aとすれば、車輌の衝突速度と重量はそれぞれ60km/h, 14Tonとなる。したがって、第17図に示す地覆による軽減エネルギーは $E_L=7.87\text{T-m}$ となり、地覆に吸収されるエネルギーを差引くと、高欄に要求されるエネルギーは $E=2.13\text{T-m}$ となる。すなわち第7表に示す1.6T-mより0.53T-m高い吸収エネルギーが実際には必要なことを示している。

つぎに、ひずみエネルギーは荷重一たわみ線図の積分値として通常求められ、Wを荷重、δをたわみとするとレールの吸収エネルギーは $E_r=1/2W\times\delta$ となり、第13図から $E_r=0.26\text{T-m}$ が得られる。しかし、3・3・2項の結果から0.26T-mのエネルギーでは破断しなかった。そこでつぎの算出方法によって吸収エネルギーを求めてみたが、その結果が比較的実際に近いようである。すなわち、 F_1 を破断力、スパン間隔をl、レールが破断する時の伸びをεとすれば、レールの吸収エネルギーは $E_r=F_1l(2\varepsilon-\varepsilon^2)/4(1+\varepsilon)$ となる。第3表から数値を代入すると $E_r=6.6\text{T-m}$ である。また車輌によりポストが破壊されるとスパン間隔が倍となり、レールの吸収エネルギーも約倍になる。

いずれにしてもかなり大きな仮定を含んでいるので、ど



第17図 高 檻 地 覆

第7表 高 檻 に 要 求 さ れ る エ ネ ル ギ

種別	適要する道路の種類	衝 突 条 件					地 覆 の 影 韵		高 檻 に 要 求 さ れ る エ ネ ル ギ (Min) (T-m)
		衝突速度 (km/hr)	車輌重量 (Ton)	衝突角度 (度)	E_t (T-m)	E_{aut} (T-m)	条 件	軽減エネルギー (T-m)	
A	高 速 道 路	60	14	15	13.2	3.2	なし	0	10
							衝突角度の影響	6.9	3.1
							60cm上がる	8.4	1.6
							50cm上がる	7.0	3
B	主要な一般国道都市高速道路	50	14	15	9.2	2.5	なし	0	6.7
							衝突角度の影響	5.1	1.6
							60cm上がる	8.4	(-1.7)
							50cm上がる	7	(-0.3)
C	その他の一般国道主要な地方道路 路都市内の主要道路	50	7	15	4.6	1.0	なし	0	3.6
							衝突角度の影響	(-2.1)	1.5
							60cm上がる	4.2	(-0.6)
							50cm上がる	3.5	(-0.1)
D	そ の 他 の 道 路	35	7	15	3.0	0.9	なし	0	2.1
							衝突角度の影響	1.65	0.45
							60cm上がる	4.2	(-2.1)
							50cm上がる	3.5	(-1.4)

(注) 地覆の影響によるボテンシャルエネルギー増は50または60cm 車輌の重心が持ち上ったとして計算。

れが正しいかということはかなり問題である。しかし、実験結果からみるとアルミニウム合金製高欄は「防護柵設置要項」で要求されるエネルギーをほぼ満足しているものと考えて間違はない。

4. 結 語

当社アルミニウム合金製高欄の形式、仕様を紹介するとともに、二、三の実験結果を紹介した。

SK-101型とSK-1710型の静的曲げ試験結果から耐力に対する安全率は約7であり、使用上十分な強度をもつ。また高速道路や中央分離帯に用いる高欄SK-103型の衝撃実験結果から地覆と高欄を1体とみなすと防護柵としての性能を十分にもつ。

静的および動的試験は大阪府特定事業建設事務所と日本道路公団大阪支社大阪天理道路工事事務所の御指導のもとに実施した。

また、静的曲げ試験を行なった当社研究部中村授氏と衝撃実験に協力していただいた日軽アルミニウム工業㈱正木勉氏に謝意を表する。

文 献

- 1) Aluminium Courier, No.82(1968-6), 2
- 2) Modern Metals, 23-6(1967-7), 77
- 3) 軽金属時代, No.401(1967-12), 4
- 4) 織田他：神戸製鋼技報, 18-3(1968-7), 53
- 5) 吉岡昭雄：自動車と道路, 22-4(1968), 297

R 121

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 10 No. 3 July 1969

陽極酸化処理皮膜の弾性率測定

田 中 英 司
鈴 木 敏 夫
平 田 勝 彦

住友軽金属工業株式会社

陽極酸化処理皮膜の弾性率測定

田中英司* 鈴木敏夫* 平田勝彦*

1. はじめに

陽極酸化処理皮膜の機械的性質はあまり明らかにされていないので、ここでは薄板に陽極酸化処理を施し、その弾性率の測定結果から皮膜のみの弾性率を計算で分離した。

また陽極酸化処理した薄板の引張試験を観察することによって、皮膜に割れが発生するときのひずみを測定したのであわせて報告する。

2. 実験条件および方法

厚さ 0.18mm の 1100-H 材を JIS 5 号試験片に成形し、つぎに示す条件で陽極酸化処理を行なった。

電解液……15%硫酸水溶液（ただしスミトーン
処理にはP-P-Sを使用）

処理時間……0.5~2h

電流密度……1, 2 A/dm²

封孔処理……なし、あり

上記処理完了後、試験片の平行部両面に抵抗線ひずみゲージ（新興通信工業社製、型式 S 108）を張付けて引張試験を行ない、試験片内に生ずる応力とひずみを測定し、ひずみ増分一応力線図からその弾性率を求め、後述する計算式を用いて陽極酸化皮膜のみの弾性率を分離した。

なお試験片の弾性率は、応力値が 2~7 kg/mm² の間のひずみ増分を基にして算出した。また試験片平行部の断面寸法は、同一条件の試験片のうちで代表的なものについてマイクロビッカース硬度計の顕微鏡を用いて測定した。

上記の測定に引き続き、陽極酸化処理を施した薄板の引張性質を測定した。このとき試験片にある程度以上のひずみが発生すると皮膜に割れが入るので、そのときのひずみ量も測定した。

3. 陽極酸化皮膜の弾性率計算方法

陽極酸化処理前の試験片の弾性率 (E_o) および断面積 (A_o)、陽極酸化処理後の試験片の弾性率 (E_t) と断面積

(A_t) および皮膜のみの断面積 (A_a) を測定し、次式を用いて皮膜の弾性率 (E_a) を算出した。すなわち負荷時の試験片の伸びを ε とすると

$$E_t \cdot A_t \cdot \varepsilon = (E_o \cdot A_o + E_a \cdot A_a) \varepsilon \\ \therefore E_a = \frac{E_t \cdot A_t - E_o \cdot A_o}{A_a}$$

4. 実験結果

4・1 陽極酸化皮膜の弾性率

写真 1 に供試材の陽極酸化皮膜の一例を示す。この厚さの測定値から面積を計算した。この試験片の引張試験を行なうと、応力が 12~16 kg/mm² に達したときに皮膜に写真 2 に示すような割れが入る。このような割れが入る前の応力とひずみの測定値から皮膜の弾性率を計算した。その結果を表 1 に示す。

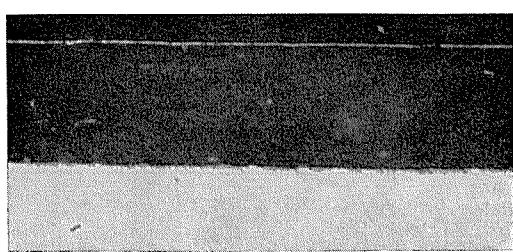
4・2 陽極酸化処理薄板の機械的強さ

試験片内の応力がある一定値以上になると、皮膜が前述したように割れる。そして応力の増加とともにその数が増加する。この割れが試験片の平行部に最初に入るときの応力 σ_c と試験片が破断するときの応力 σ_b を第 1 図に、そのときのひずみ ε_c を第 2 図に t/T (T は母材の厚さ、 t は皮膜の厚さ) の関係において示す。

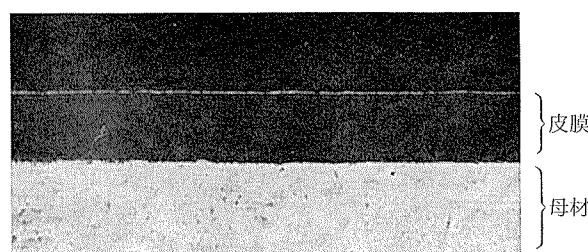
5. 結論

陽極酸化処理した 1100-H 材の薄板の弾性率および母材の弾性率を測定し、皮膜の弾性率を算出した結果、つぎのことことが明らかになった。

- 1) 陽極酸化処理皮膜の弾性率は、封孔処理を行なうとほぼ一定値を示す。またその平均値は $8.56 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ となり、母材の弾性率よりも 20% 程度高い値である。
- 2) 封孔処理を行なわない場合は、測定値のはらつきが大きい。しかしこの場合も、その平均値は封孔処理を行なった場合に近い $8.45 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2$ となる。



平均皮膜厚さ 0.025mm



平均皮膜厚さ 0.015mm

写真 1 皮膜厚さ

* 研究部

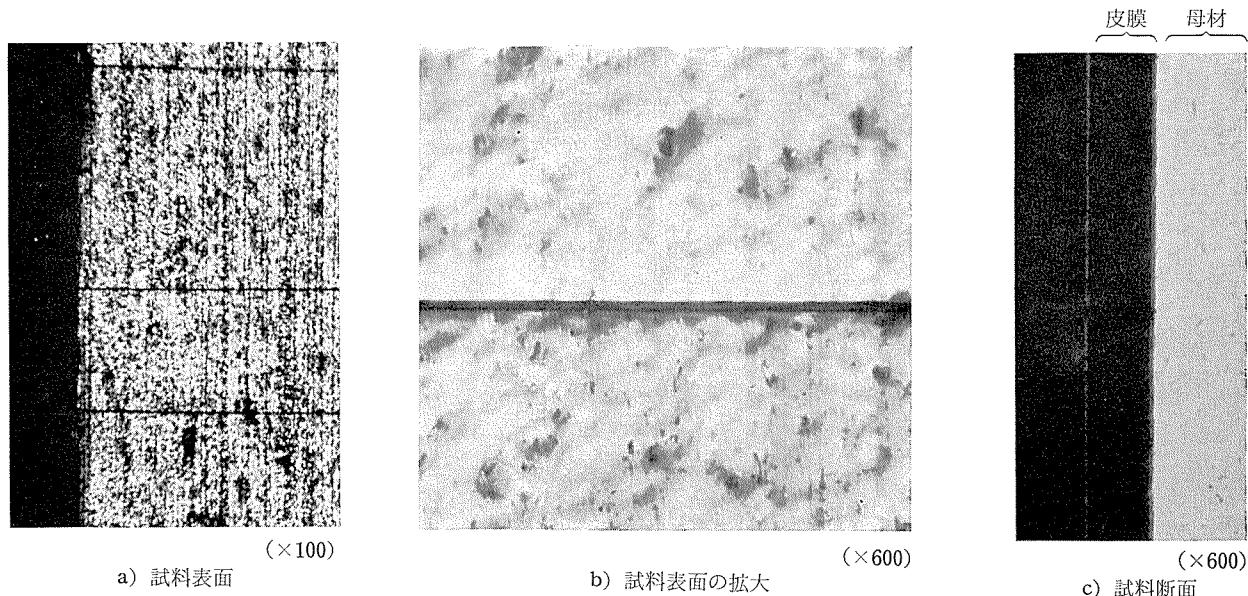


写真2. 皮膜割れ

第1表 供試材の実験条件および各部の弾性率

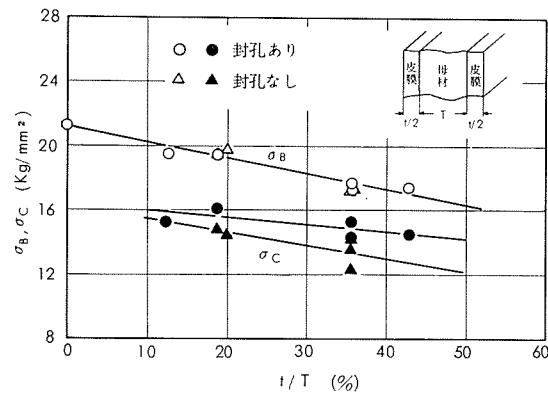
陽極酸化処理条件	封孔	断面積 (mm^2)		弾性率 ($\times 10^3 \text{kg/mm}^2$)			
		試験片母材 (A_t)	皮膜 (A_a)	試験片母材 (E_t)	皮膜 (E_a)	平均 (E_a)	
一	—	—	4.40	4.40	0	7.00 (7.03) (7.01)	7.01
硫酸	なし	4.55	3.74	0.81	7.36	7.01	8.98
		4.65	3.89	0.76	7.41 7.35 (7.38)	7.01	9.28
		4.84	3.50	1.34	7.09 7.11 (7.10)	7.01	7.33
アルマイト	あり	4.74	3.46	1.28	7.29 7.52 (7.41)	7.01	8.49
		4.63	3.93	0.70	7.23	7.01	8.46
		4.65	3.90	0.75	7.23 7.30 (7.27)	7.01	8.63
スミトーン	なし	4.75	3.43	1.32	7.42 7.32 (7.37)	7.01	8.31
		4.88	3.50	1.38	7.52 7.49 (7.51)	7.01	8.78
	あり	4.86	3.57	1.29	8.00 7.87 (7.93)	7.01	10.47
	—	4.79	3.52	1.27	8.04 7.97 (8.01)	7.01	10.78
						10.6	

（）は平均値

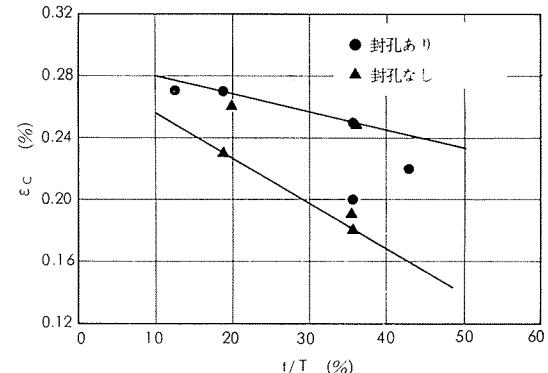
3) スミトーン処理皮膜の弾性率は、封孔の有無にかかわらずほぼ一定値を示し、その平均値は $10.6 \times 10^3 \text{kg/mm}^2$ である。

また陽極酸化処理薄板の引張性質を測定した結果、つぎのことが明らかになった。

4) 陽極酸化処理薄板の引張強さは、皮膜の厚さを厚くするほど低下する。これは皮膜の厚さを増すと母材の厚さが減少するためと、破断に先立ち皮膜層に割れが発生し、これが切欠きの役割を果すためと考えられる。



第1図 陽極酸化処理を施した薄板(1100-H)についての引張強さおよび皮膜割れ発生応力と皮膜厚さの関係



第2図 陽極酸化処理を施した薄板(1100-H)についての皮膜割れ発生時のひずみと皮膜厚さの関係

5) 皮膜に割れが発生するときの応力 σ_c も引張強さ σ_B と同じく皮膜の厚さの増加とともに低下し、その値は引張強さのほぼ80%である。また σ_c の値は封孔の有無で異なり、封孔処理を行なうと少し高くなる。

6) 皮膜層に割れが発生するときのひずみ ε_c (負荷時) も皮膜厚さの増加とともに小さくなる。その値は実験範囲内で最大0.27%，最小0.18%である。

R122

Reprinted from SUMITOMO LIGHT METAL TECHNICAL REPORTS Vol. 10 No. 3 July 1969

アルミニウムおよびその合金溶接継手の機械的性質

杉山禎彦
福井利安
入江宏

住友軽金属工業株式会社

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 1)

アルミニウムおよびその合金溶接継手の機械的性質

杉山禎彦 福井利安 入江宏

アルミニウムおよびその合金について、JISで規格化されあるいは当社で製造されている合金のうち一般的なものをとり上げ、代表的な溶加材を用いて溶接継手の機械的性質を検討した。本資料は、まず非熱処理合金についてまとめたものである。なお、以下に示すデータ・シートについて二、三の補足説明を次に記す。

1. 化学成分はいずれも代表的な分析値を一つだけ示した。
2. 溶加材はJIS, Z-3232(1964)においては溶接棒(TIG用)および電極線(MIG用)にわけられているが、ここでは便宜上溶加材として統一した。

3. 供試板の溶接は拘束治具を用いて行なった。MIG溶接条件中のアーカー電圧は母材トーチ・バスバー間の読みで表わした。
4. 引張試験片はいずれもJIS 5号であり、引張方向は圧延方向に対して直角方向とした。また、今回おこなった試験以外に筆者らが以前に検討した結果もあわせて“参考値”として示した。
5. 曲げ試験片は板厚(t)×38×250mmに成形した。曲げ半径は2t, 1.5t, 1tとし2tで割れの発生したものについてはさらに大きい曲げ半径について調べた。

1070 アルミニウム溶接継手の機械的性質

第1表 1070アルミニウム供試材の化学成分

種類	材質	化 学 成 分 (%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	1070	JIS標準範囲	<0.03	<0.03	<0.03	—	—	—	—	>99.7
		供試材	0.002	0.16	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	残
溶加材	1070		<0.01	0.16	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	〃
	1100		0.03	0.33	0.12	0.01	0.00	0.02	0.00	〃

第2表 TIG, MIG溶接条件(1070アルミニウム)

母材		溶接法	開先形状	溶接層数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーカー電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
O	4	TIG	I型	1	1070(4.0) 1100(〃)	275	—	190	13
		MIG(自動)	〃	1	1070(1.6) 1100(〃)	220	22	270	25

第3表 1070アルミニウム溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま				余盛削除			
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)
母材	O	4	—	—	7.3	2.6	56	—	—	—	—	—
溶接継手	O	4	TIG	1070	7.1	2.7	45	96	熱影響部	6.6	2.9	31
				1100	7.0	3.0	39	95	〃	6.5	3.0	28
			MIG	1070	6.8	2.8	35	92	〃	6.5	2.9	28
				1100	7.0	2.9	45	95	〃	7.0	3.0	45
												95

第4表 1070アルミニウム溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	O	4	—	—	○	○	○	—	—	—
溶接部	O	4	TIG	1070	○	○	○	○	○	○
				1100	○	○	○	○	○	○
			MIG	1070	○	○	○	○	○	○
				1100	○	○	○	○	○	○

○ 割れなし

● 微小割れ

◎ 割れ

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部

杉山禎彦
福井利安
入江宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 2)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

EC 1 および 1100 アルミニウム溶接継手の機械的性質

第5表 EC 1 アルミニウム供試材の化学成分

種類	材質	化成分(%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	EC 1	<0.12	—	—	—	—	—	—	—	>99.45
		0.001	0.13	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	残
溶加材	1070	<0.01	0.16	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	ク
		1100	0.03	0.33	0.12	0.01	0.00	0.02	0.00	ク

第6表 TIG, MIG溶接条件 (EC 1 アルミニウム)

母材		溶接法	開先形状	溶接層数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
質別	板厚(mm)								
^{1/2} H	6	TIG	Y型	2	1070(4.0) 1100(ク)	1層 310 2層 320	—	170 200	15
		MIG(自動)	I型	1	1070(1.6) 1100(ク)	300	24	270	25

第7表 EC 1 アルミニウム溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	維手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	維手効率 (%)	破断部
母材	^{1/2} H	6	—	—	11.7	11.3	20	—	—	—	—	—	—	—
溶接継手	^{1/2} H	6	TIG	1070	8.0	3.4	24	68	熱影響部	7.4	3.6	26	63	熱影響部
				1100	7.4	3.2	23	63	ク	7.3	3.4	27	62	ク
			MIG	1070	8.3	4.1	17	71	ク	7.5	4.2	20	64	ク
				1100	8.4	4.2	17	72	ク	7.6	4.2	22	65	ク

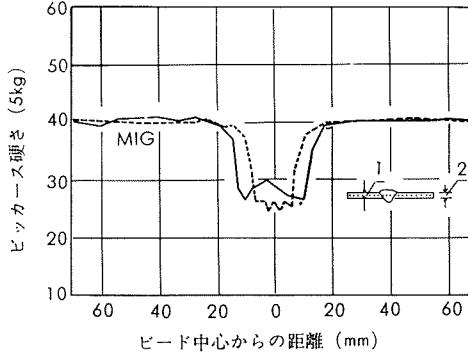
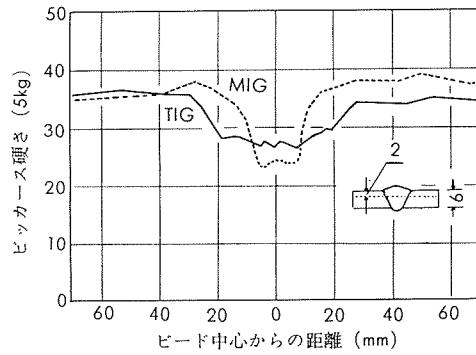
第8表 EC 1 アルミニウム溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	^{1/2} H	6	—	—	○	○	○	—	—	—
溶接部	^{1/2} H	6	TIG	1070	○	○	○	○	○	○
				1100	○	○	○	○	○	○
				1070	○	○	○	○	○	○
			MIG	1100	○	○	○	○	○	○

○ 割れなし

● 微小割れ

● 割れ



第1図 溶接部の硬さ分布 (母材: EC 1-^{1/2}H, 溶加材: 1070)

第2図 溶接部の硬さ分布 (母材: 1100-H, 溶加材: 1100)

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部 杉山禎彦
福井利安
入江宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 3)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第9表 1100アルミニウム供試材の化学成分

種類	材質	化成成分(%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	1100	JIS標準範囲	<0.20	<1.0	<1.0	<0.10	—	<0.10	—	>99.0
		供試材	0.05	0.31	0.12	0.01	0.01	0.02	<0.01	<0.01 残
溶加材	1100		0.03	0.33	0.12	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00

第10表 TIG, MIG溶接条件 (1100アルミニウム)

母材		溶接法	開先形状	溶接回数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
質別	板厚(mm)								
H	2	TIG	I型	1	1100(2.4)	100	—	160	8
		MIG(半自動)	〃	1	〃(0.8)	110	16	530	15
	4	TIG	〃	1	〃(4.0)	260	—	170	13
		MIG(自動)	〃	1	〃(1.6)	240	23	380	25

第11表 1100アルミニウム溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	維手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	維手効率 (%)	破断部
母材	H	2	—	—	17.6	16.4	7	—	—	—	—	—	—	—
			—	—	15.9	14.9	11	—	—	—	—	—	—	—
溶接継手	H	2	TIG	1100	8.5	4.5	14	65	熱影響部	8.1	5.3	8	62	溶接金属
			MIG	〃	8.6	5.4	9	66	〃	8.5	5.6	11	65	〃
	4	TIG	〃	8.4	3.9	21	53	〃	8.4	4.7	26	53	熱影響部	
			MIG	〃	8.7	4.2	18	54	〃	8.3	4.2	21	52	〃
(参考値)	H14	1	MIG	1100	9.0	5.8	5	69	熱影響部	—	—	—	—	—
	H16	2	TIG	1260	9.1	2.4	11	59	〃	9.0	—	—	58	熱影響部
			MIG	1100	9.7	5.8	5	63	〃	10.6	—	—	69	〃

第12表 1100アルミニウム溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	H	2	—	—	○	○	○	—	—	—
			—	—	○	●	●	—	—	—
溶接部	H	2	TIG	1100	○	○	○	○	○	○
			MIG	〃	○	○	○	○	○	○
	4	TIG	〃	○	○	○	○	○	○	○
			MIG	〃	○	○	○	○	○	○
			TIG	〃	○	○	○	○	○	○

○ 割れなし

● 微小割れ

● 割れ

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部 杉山禎彦
福井利宏
入江安宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 4)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

3003 および 3004 アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第13表 3003合金供試材の化学成分

種類	材質	化 学 成 分 (%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	3003 供試材	JIS標準範囲 0.01	<0.20 0.56	<0.7 0.08	<0.6 1.19	1.0~1.5 <0.01	— 0.02	<0.10 <0.01	— <0.01	— <0.01
		1100	0.03	0.33	0.12	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
溶加材										残

第14表 TIG, MIG溶接条件 (3003合金)

母材		溶接法	開先形状	溶接層数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
質別	板厚(mm)								
O,H	2	TIG	I型	1	1100(2.4)	115	—	180	8
		MIG(半自動)	〃	1	〃(0.8)	115	16	530	15
$\frac{1}{2}H$	4	TIG	〃	1	〃(4.0)	250	—	180	12
		MIG(自動)	〃	1	〃(1.6)	220	22	550	25

第15表 3003合金溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部
母材	O	2	—	—	10.0	4.4	45	—	—	—	—	—	—	—
	H	2	—	—	19.8	18.5	4	—	—	—	—	—	—	—
	$\frac{1}{2}H$	4	—	—	15.2	14.3	11	—	—	—	—	—	—	—
溶接継手	O	2	TIG	1100	9.3	4.2	30	93	熱影響部	9.2	4.8	21	92	熱影響部
			MIG	〃	9.5	4.9	27	95	〃	9.8	4.9	26	98	〃
	H	2	TIG	〃	10.8	5.3	15	55	〃	10.5	5.5	15	53	〃
			MIG	〃	11.0	6.1	10	56	〃	10.2	5.9	9	52	溶接金属
	$\frac{1}{2}H$	4	TIG	〃	10.4	5.1	17	68	〃	10.5	6.0	19	69	熱影響部
			MIG	〃	10.3	6.1	17	68	〃	10.4	5.8	16	68	〃
	(参考値)	H14	MIG	1100	11.1	8.2	3	64	熱影響部	—	—	—	—	—
			TIG	1200	10.7	6.4	10	63	〃	10.6	—	—	62	熱影響部
			MIG	1100	10.9	6.9	6	64	〃	11.0	—	—	64	〃

第16表 3003合金溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	O	2	—	—	○	○	○	—	—	—
	H	2	—	—	○	○	●	—	—	—
	$\frac{1}{2}H$	4	—	—	○	○	○	—	—	—
溶接部	O	2	TIG	1100	○	○	○	○	○	○
			MIG	〃	○	○	○	○	○	○
	H	2	TIG	〃	○	○	○	○	○	○
			MIG	〃	○	○	○	○	○	○
	$\frac{1}{2}H$	4	TIG	〃	○	○	○	○	○	○
			MIG	〃	○	○	○	○	○	○

○ 割れなし ● 微小割れ ● 割れ

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部 杉山禎彦
福井利安
入江宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 5)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第17表 3004合金供試材の化学成分

種類	材質	化 学 成 分 (%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	3004	A.A.標準範囲	<0.25	<0.7	<0.30	1.0~1.5	0.8~1.3	<0.25	—	—
		供試材	0.01	0.16	0.08	1.20	1.07	<0.01	<0.01	<0.01
溶加材	1100		0.03	0.33	0.12	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
	5356		<0.01	0.12	0.05	0.10	4.90	<0.01	0.08	0.09

第18表 TIG, MIG溶接条件 (3004合金)

母材		溶接法	開先形状	溶接層数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
質別	板厚(mm)	TIG	I型	1	1100(2.4) 5356(2.4)	115	—	180	8
					1100(5.0)				
F	5	MIG(自動)	X型	2	1 (1.6) 2 (0.8)	290 1層 285 2層 300	— 23 24	145 750	12 25
	10								

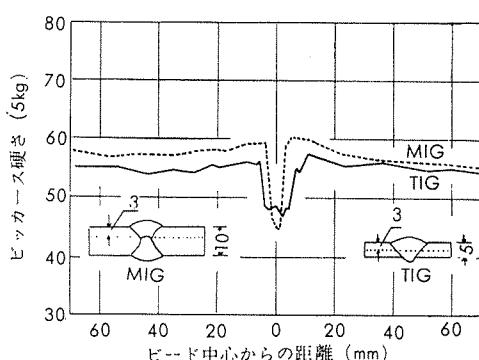
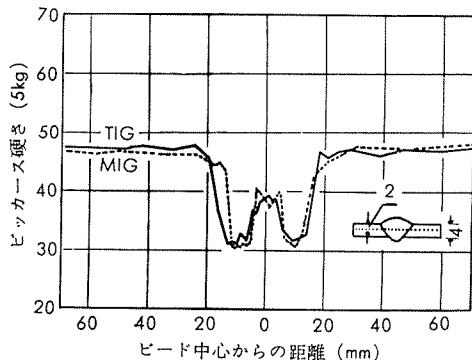
第19表 3004合金溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部
母材	H	2	—	—	27.9	24.9	7	—	—	—	—	—	—	—
	F	5,10	—	—	19.8	10.0	23	—	—	—	—	—	—	—
溶接部	H	2	TIG	1100	19.5	10.4	9	70	熱影響部	14.1	9.4	6	51	溶接金属
			〃	5356	19.6	10.9	6	70	〃	19.0	11.0	6	68	熱影響部
	F	5	〃	1100	19.0	9.7	15	95	〃	14.6	8.4	13	73	溶接金属
			10	MIG	〃	18.1	10.7	17	91	溶接金属	16.0	10.2	12	82

第20表 3004合金溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	H	2	—	—	○(8t)	○(7t)	●(6t)	—	—	—
	F	5,10	—	—	○	○	○	—	—	—
溶接部	H	2	TIG	1100	○	○	○	○	○	○
			〃	5356	○	○	○	○	○	○
	F	5	〃	1100	○	○	○	○	○	○
			10	MIG	〃	○(3t)	●(2.5t)	●(2t)	—	—

○ 削れなし ① 微小割れ ● 削れ



第3図 溶接部の硬さ分布 (母材: 3003-1/2H, 溶加材: 1100)

第4図 溶接部の硬さ分布 (母材: 3004-F, 溶加材: 1100)

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

杉山禎彦
研究部
福井利安
入江宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 6)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

深絞り用 G 0 および 5005 アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第21表 G 0 合金供試材の化学成分

種類	材質	化成成分(%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	G 0	標準範囲	—	—	—	—	—	—	—	≥99.0
		供試材	—	—	—	—	—	—	—	99.26
溶加材	5183	<0.01	0.12	0.05	0.72	4.80	<0.01	0.10	<0.01	残
	共金(G 0)	—	—	—	—	—	—	—	—	99.26

第22表 TIG, MIG溶接条件 (G 0 合金)

母材		溶接法	開先形状	溶接回数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーチ電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (L/min)
H	2.2	TIG	I型	1	共金(2.2)	140	—	180	8
		✓	✓	1	5183(2.4)	140	—	180	8
		MIG(半自動)	✓	1	✓ (0.8)	115	15	490	15
R	4.2	TIG	✓	1	✓ (4.0)	265	—	140	12
		MIG(自動)	✓	1	✓ (1.6)	235	22	600	25
H	10	✓	X型	2	✓ (✓)	1層 310 2層 330	23 24	500	25

第23表 G 0 合金溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚(mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	結手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	結手効率 (%)	破断部
母材	H	2.2	—	—	16.0	14.5	16	—	—	—	—	—	—	—
	R	4.2	—	—	12.0	8.9	30	—	—	—	—	—	—	—
	H	10	—	—	14.8	14.2	20	—	—	—	—	—	—	—
溶接継手	H	2.2	TIG	共金	10.1	5.6	11	63	熱影響部	9.4	5.9	10	59	溶接金属
			✓	5183	10.1	6.0	10	63	✓	10.0	6.1	11	63	熱影響部
			MIG	✓	10.7	7.4	7	67	✓	10.6	7.6	7	66	✓
	R	4.2	TIG	✓	9.7	5.3	16	81	✓	9.6	5.9	18	80	✓
			MIG	✓	9.7	6.1	14	81	✓	9.8	7.1	13	82	✓
	H	10	✓	✓	12.7	8.6	22	86	✓	11.5	7.1	17	78	✓

第24表 G 0 合金溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚(mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	H	2.2	—	—	○	○	●	—	—	—
	R	4.2	—	—	○	○	○	—	—	—
	H	10	—	—	○	○	○	—	—	—
溶接部	H	2.2	TIG	共金	○	○	○	○	○	○
			✓	5183	○	○	○	○	○	○
			MIG	✓	○	○	○	○	○	○
	R	4.2	TIG	✓	○	○	○	○	○	○
			MIG	✓	○	○	○	○	○	○
	H	10	✓	✓	○	○	○	—	—	—

○ 削れなし

● 微小割れ

● 削れ

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部 杉山 順彦
福井 利安
入江 宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 7)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第25表 5005合金供試材の化学成分

種類	材質	化 学 成 分 (%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	5005	JIS標準範囲	<0.20	<0.7	<0.40	<0.20	0.50~1.1	<0.25	<0.10	—
		供試材	0.01	0.55	0.15	0.01	0.83	0.02	<0.01	0.06
溶加材		5183	<0.01	0.12	0.05	0.72	4.80	<0.01	0.10	<0.01

第26表 TIG, MIG溶接条件 (5005合金)

母材		溶接法	開先形状	溶接層数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーチ電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
$\frac{1}{2}H$	4	TIG	I型	1	5183(4.0)	240	—	160	12
		MIG(自動)	〃	1	〃(1.6)	220	22	800	25
$\frac{3}{4}H$	10	〃	X型	2	〃(〃)	1層 310 2層 330	23 24	500	25

第27表 5005合金溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	維手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	維手効率 (%)	破断部
母材	$\frac{1}{2}H$	4	—	—	17.5	16.4	11	—	—	—	—	—	—	—
	$\frac{3}{4}H$	10	—	—	19.0	17.5	17	—	—	—	—	—	—	—
溶接部	$\frac{1}{2}H$	4	TIG	5183	12.7	6.9	11	73	熱影響部	12.6	7.2	12	72	熱影響部
			MIG	〃	12.9	8.0	8	74	〃	12.9	8.9	10	74	〃
	$\frac{3}{4}H$	10	〃	〃	16.2	10.6	16	85	〃	15.1	8.4	17	79	〃

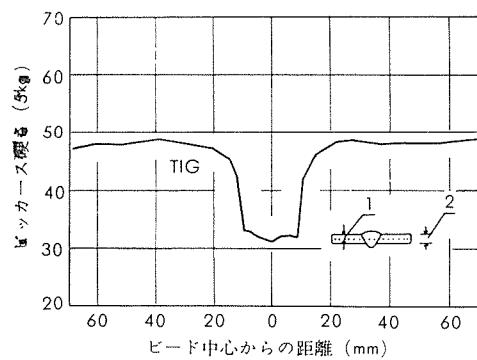
第28表 5005合金溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	$\frac{1}{2}H$	4	—	—	○	○	①	—	—	—
	$\frac{3}{4}H$	10	—	—	○	○	①	—	—	—
溶接部	$\frac{1}{2}H$	4	TIG	5183	○	○	○	○	○	○
			MIG	〃	○	○	○	○	○	○
	$\frac{3}{4}H$	10	〃	〃	○	○	○	—	—	—

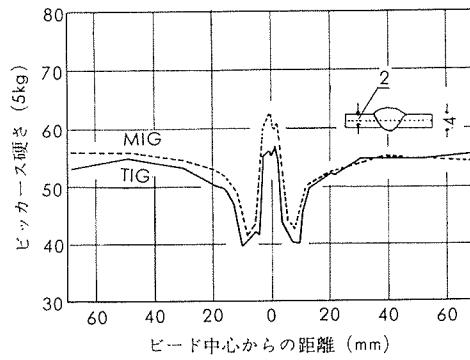
○割れなし

①微小割れ

●割れ



第5図 溶接部の硬さ分布 (母材: G0-H, 溶加材: 共金)



第6図 溶接部の硬さ分布 (母材: 5005-1/2H, 溶加材: 5183)

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 8)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

5050 および 5052 アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第29表 5050合金供試材の化学成分

種類	材質	化成成分(%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	
母材	5050 A.A.標準範囲	<0.20	<0.70	<0.40	<0.10	1.0~1.8	<0.25	<0.10	—	残
		<0.01	0.15	0.08	0.01	1.45	<0.01	<0.01	<0.01	〃
溶加材	5356	<0.01	0.12	0.05	0.10	4.90	<0.01	0.09	0.09	〃

第30表 TIG, MIG溶接条件(5050合金)

母材		溶接法	開先形状	溶接回数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーチ電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
質別	板厚(mm)								
H	2	TIG	I型	1	5356(2.4)	115	—	210	8
F	5	〃	〃	1	〃(4.0)	290	—	170	12
	10	MIG(自動)	X型	2	〃(1.6)	1層 300 2層 330	24 24	500	25

第31表 5050合金溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm²)	耐力 (kg/mm²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm²)	耐力 (kg/mm²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部
母材	H	2	—	—	24.1	20.8	8	—	—	—	—	—	—	—
	F	5	—	—	13.4	3.9	39	—	—	—	—	—	—	—
	F	10	—	—	13.4	3.9	39	—	—	—	—	—	—	—
溶接継手	H	2	TIG	5356	15.6	8.6	8	65	熱影響部	15.7	8.4	9	65	熱影響部
	F	5	〃	〃	13.2	5.8	26	99	〃	13.5	5.6	27	100	〃
	F	10	MIG	〃	13.4	5.9	27	100	〃	13.3	6.0	29	99	〃

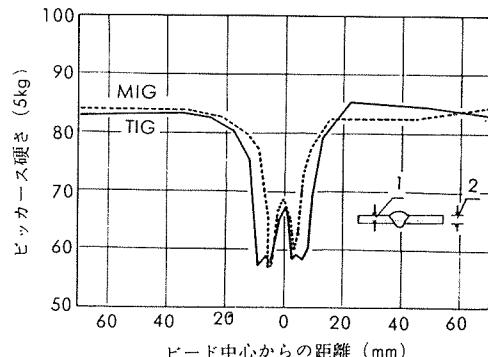
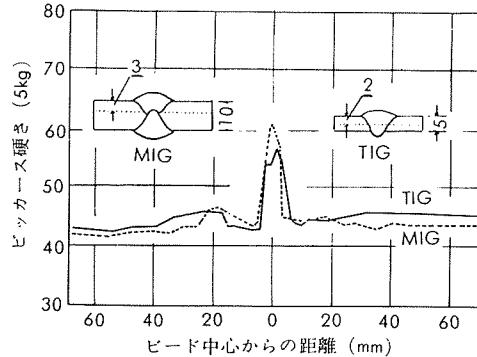
第32表 5050合金溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	H	2	—	—	○(5t)	●(4.5t)	●(4t)	—	—	—
	F	5	—	—	○	○	○	—	—	—
	F	10	—	—	○	○	○	—	—	—
溶接部	H	2	TIG	5356	○	○	○	○	○	○
	F	5	〃	〃	○	○	○	○	○	○
	F	10	MIG	〃	○	○	○	—	—	—

○ 割れなし

● 微小割れ

● 割れ



第7図 溶接部の硬さ分布(母材: 5050-F, 溶加材: 5356)

第8図 溶接部の硬さ分布(母材: 5052-H32, 溶加材: 5356, 5056)
(TIG)(MIG)

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部 杉山徳彦
福井利安
入江宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 9)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第33表 5052合金供試材の化学成分

種類	材質	化 学 成 分 (%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	5052	JIS標準範囲	<0.10	<0.45	<0.45	<0.10	2.2~2.8	<0.10	0.15~0.35	—
		供試材	0.01	0.27	0.10	<0.01	2.66	0.01	0.22	<0.01
溶加材	5056		<0.01	0.17	0.06	0.11	4.58	<0.01	0.11	0.11
	5356		<0.01	0.09	0.04	0.11	4.84	<0.01	0.10	0.10

第34表 TIG, MIG溶接条件 (5052合金)

母材		溶接法	開先形状	溶接層数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーチ電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
質別	板厚(mm)								
H32	2	TIG	I型	1	5356(2.4)	125	—	150	8
		MIG(半自動)	〃	1	5056(0.8)	110	16	780	15
H14	4	TIG	〃	1	5356(3.2)	215	—	150	13
		MIG(自動)	〃	1	〃(1.6)	215	22	800	25
O	10	〃	X型	2	〃(〃)	1層 300 2層 330	23 24	400	25

第35表 5052合金溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部
母材	H32	2	—	—	26.2	20.3	12	—	—	—	—	—	—	—
	H14	4	—	—	26.6	21.5	19	—	—	—	—	—	—	—
	O	10	—	—	21.4	8.1	36	—	—	—	—	—	—	—
溶接継手	H32	2	TIG	5356	21.3	10.9	10	81	熱影響部	21.0	11.2	11	80	熱影響部
			MIG	5056	22.2	11.4	8	85	〃	21.4	13.3	7	81	〃
	H14	4	TIG	5356	21.7	9.6	14	82	〃	20.3	9.4	16	82	〃
			MIG	〃	22.2	11.4	12	84	〃	20.1	10.8	13	76	〃
	O	10	〃	〃	21.1	9.3	22	99	〃	20.8	9.5	28	97	〃
(参考値)	H12	2	TIG	5356	20.9	12.3	8	90	〃	20.4	—	—	88	〃
			MIG	5056	22.3	14.8	6	96	〃	21.2	—	—	90	境界部
	H16	2	TIG	5356	20.4	11.7	6	74	〃	20.4	—	—	73	熱影響部
			MIG	5056	20.8	12.0	4	76	〃	20.3	—	—	74	〃

第36表 5052合金溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	H32	2	—	—	○	○	○	—	—	—
	H14	4	—	—	○	○	①	—	—	—
	O	10	—	—	○	○	○	—	—	—
溶接部	H32	2	TIG	5356	○	○	○	○	○	○
			MIG	5056	○	①	①	○	①	①
	H14	4	TIG	5356	○	○	①	○	○	①
			MIG	〃	○	○	①	○	○	①
	O	10	〃	〃	○	○	○	—	—	—

○ 削れなし

① 微小割れ

◎ 削れ

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部 杉山禎彦
福井利安
入江宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3. 10)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

5154 および 5083 アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第37表 5154合金供試材の化学成分

種類	材質	化成分(%)									
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al	
母材	5154	JIS標準範囲	<0.10	<0.45	<0.45	<0.10	3.1~3.9	<0.20	0.15~0.35	—	残
		供試材	<0.01	0.13	0.07	<0.01	3.58	<0.01	0.24	<0.01	〃
溶加材	5356		<0.01	0.12	0.05	0.10	4.90	<0.01	0.09	0.09	〃

第38表 TIG, MIG溶接条件 (5154合金)

母材		溶接法	開先形状	溶接回数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーチ電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (l/min)
質別	板厚(mm)								
R	4.2	TIG	I型	1	5356(4.0)	280	—	150	12
		MIG(自動)	〃	1	〃(1.6)	240	24	800	25
F	10	〃	X型	2	〃(〃)	1番 305 2番 330	23 24	500	25

第39表 5154合金溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除				
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	継手効率 (%)	破断部
母材	R	4.2	—	—	25.0	12.2	30	—	—	—	—	—	—	—
	F	10	—	—	23.1	—	37	—	—	—	—	—	—	—
溶接継手	R	4.2	TIG	5356	25.1	11.2	25	100	熱影響部	23.9	11.2	20	96	熱影響部
			MIG	〃	25.2	11.4	22	100	〃	24.7	11.0	25	99	溶接金属
	F	10	〃	〃	23.0	9.8	24	100	〃	23.3	10.2	30	100	熱影響部
(参考値)	R	20	〃	5056(Y型)	25.4	12.2	26	98	熱影響部	25.1	11.3	30	97	〃
		〃	〃(V型)	〃	25.4	14.5	23	98	〃	25.1	12.8	22	97	〃

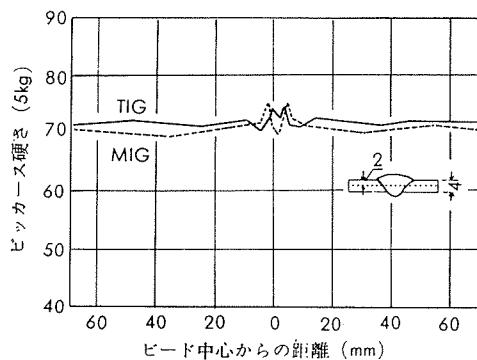
第40表 5154合金溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	R	4.2	—	—	○	○	○	—	—	—
	F	10	—	—	○	○	○	—	—	—
溶接部	R	4.2	TIG	5356	○	○	○	○	○	○
			MIG	〃	○	○	○	○	○	○
	F	10	〃	〃	○	○	●	—	—	—

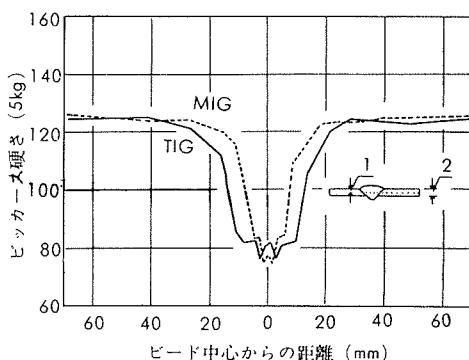
○ 割れなし

● 微小割れ

■ 割れ



第9図 溶接部の硬さ分布 (母材: 5154-R, 溶加材: 5356)



第10図 溶接部の硬さ分布 (母材: 5083-H, 溶加材: 5183)

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部 杉山禎彦
福井利安
入江宏

TECHNICAL DATA SHEET (10-3.11)

アルミニウム合金溶接継手の機械的性質

第41表 5083合金供試材の化学成分

種類	材質	化成分(%)								
		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
母材	5083	JIS標準範囲	<0.10	<0.40	<0.40	0.30~1.0	3.8~4.8	<0.10	<0.50	<0.20
		供試材	0.01	0.20	0.09	0.66	4.48	<0.01	0.19	<0.01
溶加材	5183		<0.01	0.12	0.05	0.72	4.80	<0.01	0.10	<0.01

第42表 TIG, MIG溶接条件(5083合金)

母材		溶接法	開先形状	溶接層数	溶加材 (線径, mm)	溶接電流 (A)	アーク電圧 (V)	溶接速度 (mm/min)	アルゴン流量 (L/min)
質別	板厚(mm)								
H	2	TIG	I型	1	5183(2.4)	120	—	150	8
		MIG(半自動)	タ	1	タ(0.8)	110	16	600	15
O,H	4	TIG	タ	1	タ(4.0)	220	—	160	12
		MIG(自動)	タ	1	タ(1.6)	220	22	800	25
1/2H	10	タ	X型	2	タ(タ)	1 _脚 305 2 _脚 335	23.5 24	500	25

第43表 5083合金溶接継手の引張性質

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	余盛のまま					余盛削除						
					引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)	伸び (%)	破断部	引張強さ (kg/mm ²)	耐力 (kg/mm ²)		
母材	H	2	—	—	45.5	37.9	8	—	—	—	—	—	—	—	—	
	O	4	—	—	33.4	16.0	22	—	—	—	—	—	—	—	—	
	H	4	—	—	43.6	34.5	11	—	—	—	—	—	—	—	—	
	1/2H	10	—	—	40.3	32.7	9	—	—	—	—	—	—	—	—	
溶接継手	H	2	TIG	5183	31.8	15.3	10	70	熱影響部	27.1	14.4	9	60	溶接金属		
			MIG	タ	32.1	17.1	6	71	タ	27.2	15.5	6	60	タ		
	O	4	TIG	タ	33.5	15.8	16	100	タ	28.9	14.7	12	87	タ		
			MIG	タ	33.6	16.7	17	100	タ	28.7	14.3	14	86	タ		
	H	4	TIG	タ	32.9	15.9	12	76	タ	29.2	14.6	11	67	タ		
			MIG	タ	33.5	17.5	8	77	タ	29.0	15.6	10	67	タ		
	1/2H	10	タ	タ	33.6	17.4	12	81	タ	30.3	14.6	16	75	タ		
	(参考値)	R	13	タ	5056	31.4	17.9	14	97	タ	30.8	16.7	16	95	タ	
			タ	5356	31.8	17.6	16	98	タ	30.7	16.0	16	95	タ		

第44表 5083合金溶接部の180°曲げ試験結果

種類	質別	板厚 (mm)	溶接法	溶加材	表曲げ			裏曲げ		
					内側曲げ半径			内側曲げ半径		
					2.0t	1.5t	1.0t	2.0t	1.5t	1.0t
母材	H	2	—	—	○(7t)	①(6t)	●(5t)	—	—	—
	O	4	—	—	○	○	○	—	—	—
	H	4	—	—	○	●	●	—	—	—
	1/2H	10	—	—	○(6t)	①(5t)	●(4t)	—	—	—
溶接部	H	2	TIG	5183	○	○	○	○	○	○
			MIG	タ	○	①	●	○	①	●
	O	4	TIG	タ	○	○	①	○	○	①
			MIG	タ	○	○	①	○	○	①
	H	4	TIG	タ	○	○	①	○	○	①
			MIG	タ	○	○	①	○	○	①
	1/2H	10	タ	タ	○	○	①	—	—	—

○ 削れなし

① 微小割れ

● 削れ

(昭和44年7月)

住友軽金属工業株式会社

研究部 杉山禎彦
福井利安
入江宏