資 料

アルミニウムおよびその合金溶接部の諸性質におよぼす 含有水素ガスについて*

安 藤 良 夫** 藤 村 理 人***

Behavior of Hydrogen Gas in Welds of Aluminium and Its Alloys*

By Yoshio Ando** and Tadato Fujimura***

1. 序 論

一般に金属内に含有されるガスが金属の諸性質に大きな影響を与えることが知られている¹⁻⁴⁾。

その場合、影響を与える主なガスの種類は水素、酸素、窒素である。アルミニウムおよびその合金においてもこれらのガスの影響は例外ではないが、アルミニウムと窒素の間では AlN またはアルミニウムと酸素の間では Al_2O_3 という比較的安定な化合物をつくって金属中または金属表面に析出することになるので、窒素および酸素の影響はこれら化合物の影響におきかえられることになる。ところが、一方、アルミニウム合金中に含有される水素はどういう形で存在するのかいまだ十分明かではないが、アルミニウムの含有ガスを分析すると全ガス量の80%以上が水素であることが明らかにされている。すなわち、アルミニウム中には水素が単体として含有され、直接的に諸性質に影響することがわかる。しかしながら、後に述べるごとく、アルミニウムと水素との間には溶解吸収というような簡単な現象で片づけられないいくつかの問題点を有している。ともあれ、アルミニウムの諸性質に直接影響する含有ガスは水素であると限定して考えてさしつかえないと思われる。そのため、ここではアルミニウムおよびその合金溶接部の諸性質におよぼす含有ガスを水素に限ってその影響を論究することにする。

アルミニウムおよびその合金の溶接部の諸性質に含有された水素がどのように影響するかは、いくつかの文献

で知られているが⁵⁻¹⁰⁾、第1に、気孔を生じ外見的にスエイング、ブリストアなどを生ずること、第2には機械的性質の劣化を生ずることである。また最近では原子炉構造などの高品質構造においてリーク・タイトが要求されるがこれに対する含有ガスの影響はいうまでもなく明らかである。

アルミニウム合金溶接部における水素の影響は、1) 気孔となった水素の影響と2) 固溶した水素の影響とに分けることができる。前者は主としてマクロ的な影響となっており、後者は主としてミクロ的な影響となっており。

以下著者らはこれらの諸影響を次のいくつかの論点に分けて述べることにする。

- 1) 機械的性質と水素の影響
- 2) 溶接条件と水素の影響
- 3) 溶接心線の処理と水素の影響
- 4) 溶接部に含有する水素の理論

2. 含有水素の機械的性質におよぼす影響

Daley, M.D. は Al-Mg 合金の溶接部の気孔が機械的性質におよぼす影響を研究した⁷⁾。これはミサイルの開発研究において、燃料庫、ボディ、エンジンなどに使用する Al-Mg 合金について検討したものである。

図-1 は母材 (規格 5086-H 44, Si : 0.40%, Fe : 0.50%, Cu : 0.10%, Mn : 0.20~0.7%, Mg : 3.5~4.5%, Cu : 0.05~0.25%, Zn : 0.25%) を心線 (規格 5356, Si : 0.50%, Cu : 0.10%, Mn : 0.05~0.20%, Mg : 4.5~5.6%, Cr : 0.05~0.20%, Zn : 0.10%) で Tig 溶接した溶接部について、溶接部気孔の機械的性質への影響を示したも

* 原稿受付, 昭和37年5月1日 (特殊溶接研究委員会において発表)

** 正員, 東京大学生産技術研究所 Member, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

*** 正員, 日本原子力研究所東海研究所 Member, Tokai Laboratory, Japan Atomic Energy Research Institute

図-1 Al-Mg 合金溶接部の気孔 (ABMA) と強度の関係

のである。横軸に気孔の X 線検査級をとっているが、この級は ABAM (Army Ballistic Missile Agency) の X 線検査規格である。

日本溶接協会ではアルミニウム合金溶接部の検査規準をつくるため、溶接部の欠陥と機械的諸性質および腐食性におよぼす影響を求める研究を行なった¹¹⁾。同研究に用いられた Al-Mg 合金は母材 (ANP-0, Cu : 0.10% >, Si : 0.40% >, Fe : 0.40% >, Mn : 1.0% >, Mg : 3.0~4.7%, Cr : 0.50% >, Zn : 0.10% >, Ti : 0.27% >) を心線 (ANW) で溶接したものである。

図-2 および図-3 は引張り試験により気孔と強度の関係を求めたものである。継手効率は同形の母材試験片の平均引張り強さ (29.9 kg/mm²) を 100% として継手の

図-2 溶接継手の引張り強さと気孔の関係 (余盛りあり)

強度を示したものである。余盛りのある場合は JIS 4~5 級でも突合せ継手の継手効率は 100% であるが、7 級では溶接部で破断している。余盛りを削除したものは、気孔が 1~2, 4~5, 7~10 級と悪くなり欠陥が大きくなるにしたがって継手効率は低下している。

著者らは同じ材料を型曲げ試験によって溶接部気孔と継手強度の関係を求めた¹²⁾。表-1 はその試験結果を示す。この試験の結果、A-4 型治具で試験したとき、裏

図-3 溶接継手の引張り強さと気孔の関係 (余盛り削除)

表-1 Al-Mg 合金溶接部の気孔と型曲げ試験結果の関係

試験片番号	型曲げ試験		気孔率%	X線検査 JIS 級
	A-2 型治具	A-4 型治具		
I-1	F ○	—	—	0*
I-2	R ○	—	—	0*
I-3	F ○	—	—	0*
I-4	R ○	—	—	0*
I-5	—	F ○	—	0*
I-6	—	R ○	—	0*
II-1	—	F ○	0.35	0*
II-2	—	F ○	0.41	0*
I-7	F ×	—	—	1
I-8	R ×	—	—	1
I-9	—	F ○	—	1
I-10	—	R ○	—	1
II-3	—	F ○	—	1
II-4	—	F ○	—	1
II-5	—	F ○	0.42	2
II-6	—	F ×	—	3
I-11	—	F ×	—	4
I-12	—	R ○	—	4
II-7	—	F ×	—	4
II-8	—	F ×	0.63	5
I-13	—	F ×	—	7
I-14	—	R ○	—	7

F : 表曲げ R : 裏曲げ ○ : 合格 × : 不合格
* : 無気孔

曲げ試験は全部合格したが、表曲げ試験ではX線検査 JIS 2 級までは合格、それ以下は不合格という結果となった。表曲げ試験と裏曲げ試験の差は気孔が溶接部表側に集中する傾向によると思われる。また JIS 3 級以下の不合格の要因については5で考察する。

3. 溶接条件と溶接部の含有水素ガス

アルミニウム合金溶接部の気孔は溶接条件によって左右されることはいうまでもない。しかし、一概に溶接条件といっても、その因子は多種多様である。これらの因子を整理すると次のごとくなる。

A) 溶接施工条件

溶接電流、溶接電圧、アルゴン流量などの溶接施工条件。

B) 溶接時の熱的条件。

バックングの状態、溶接速度などにより、溶接入熱および熱伝達の状態が異なる。すなわち、冷却速度、溶融池の温度、溶融池の凝固時間などの因子

C) 溶接施工雰囲気。

湿度、気温など溶接施工の場所の影響

これらの3条件は独立した因子でなく、溶接施工にあたっては常に複合してあらわれる。そのため、溶接部気孔に最も強い影響を与える因子を捉えることはなかなか困難である。アルミニウム合金材料溶接において無気孔の健全な溶着部を得ることの困難さもこの辺にあるものと考えられる。

著者らは Al-Mg 合金 (52S) を心線 (54S) で Tig

図—4 Al-Mg 合金溶接部の含有ガス量と溶接入熱の関係

法により溶接した場合の溶接条件と溶接部の含有水素の影響を検討した⁹⁾。

図—4は溶接時の溶接入熱が溶接部の含有ガス量* におよぼす影響を示すものである。一般に溶接入熱が大きいとき、含有水素量は少なくなる傾向にある。すなわち、溶接速度が早いときは含有水素量は多くなる傾向がある。また Tig 溶接法より Mig. 溶接法の方が気孔も多くあらわれる。図—5は同じ溶接部における溶接入熱とX線による気孔数との関係を示すものであるが図—4に示す結果と同様な傾向を示している。

図—6は溶接部の予熱が含有水素量におよぼす影響

図—5 Al-Mg 合金溶接部のX線気孔数と溶接入熱の関係

図—6 Al-Mg 合金溶接部の含有水素量と予熱温度の関係

* 既報のガス含有量は分析装置の測定々数に誤りがあったので今回訂正した。

を示したものである。予熱によって含有水素量の低下があらわれている。また上向き溶接ではきわめて多量の水素を含有することがわかる。板厚についていえば板厚の大きい程水素含有量が少ない傾向がある。

鈴木、村瀬氏は耐食アルミニウム合金 (ANP) を Mig によって溶接した場合の溶接条件と溶接部気孔の関係を求めている¹³⁾。図-7, 8, 9はその実験結果を示す。その結果を要約すると次のごとくである。

1) アークの安定度 (アーク電圧) と気孔の関係

一般に、アーク電圧が低い程気孔が少ない。150 A 程度の低電流でしかも過大電圧 (28 V) の場合には気孔の発生が多い。

アーク電圧の影響はアーク電流の大きい場合 (例えば 250 A) それほどいじるしくあらわれない。その理由は高電流を用いると気孔が減少する傾向があるためである。

2) 溶接入熱 (溶接電流, 溶接速度) と気孔の関係

溶接電流の増加, 溶接速度の減少にともない溶接入熱は増加して, 溶融池の溶融時間が長くなりガスの放出が容易になる。

図-7 溶接部気孔と溶接電流の関係

図-8 溶接部気孔と溶接電圧の関係

図-9 溶接部気孔と溶接速度の関係

溶接速度が 25 ipm 以下では気孔の数は減少しており, アーク電流 15 ipm 以下になると X 線気孔は全く見られなくなった。

昭和32年に日本溶接協会原子力研究委員会は“原子炉およびその附属装置に必要なアルミニウムおよびステンレス鋼の溶接施工ならびに検査に関する試験研究”を実施したが, そのなかで, 溶接部気孔の研究を各研究機関と各社が実施し, 山口氏*がまとめた報告がある¹⁴⁾。

それによると, 工業純アルミニウム (2S) とアルミニウム合金 (52S, 心線は 54S) を用いて溶接した場合の溶接部気孔の発生について明らかにされている。図-10に示されるごとく, 溶接入熱, 溶接電流と気孔の関係は Mig. 法の場合, 適正電流をはずれたときは気孔の発生は多く, 溶接入熱が大きいほど気孔の発生は少なくなるが, 同一入熱の場合でも電流の大小さになり, 溶接部気孔の発生は大きく影響される。

また冷却速度と断面検査による溶接部気孔の関係については, 図-11に示されるごとくで, その影響は相当大きいことがわかる。

図-10 溶接入熱と溶接部気孔の関係

* 茨城大学工学部

図—11 溶接部の冷却速度と溶接部気孔の関係

4. 溶接心線の処理と含有水素ガスの関係

溶接部の含有水素量は、板自体の含有水素量および溶接心線の含有水素量により大きな影響を与られる。このことは、Hull, W.G.¹⁴⁾ らによって明らかにされている。

溶接心線より溶接部に入る水素源については次のごとくわけることができる。

- 1) 溶接心線内に含有するガス
- 2) 溶接心線の表面にできた腐食生成物の結晶水が溶接に際して分解するもの
- 3) 溶接心線の表面にできた酸化皮膜に吸着している

表—2 アルミニウム (2S) 溶接心線の前処理と含有ガス量の関係

試験番号	心線の処理	処理目的	全ガス量 ml/100g	水素量 H ₂ ml/100g	水素 容量%
1	線引のみ	処理したものとの比較	2.8	2.1	74.9
2	沸騰水中で1時間加熱後大気に1日暴露	多量の水分の附着	8.7	6.9	79.3
3	表面を機械的に削除	機械的処理の影響	1.6	1.3	81.3
4	布で油を除去	簡単な処理	2.9	2.4	82.9
5	油をCCl ₄ 蒸気による脱脂	蒸気処理	1.8	1.1	61.1
6	CrO ₃ +H ₃ PO ₄ 溶液で処理		1.8	1.3	72.2
7	C ₆ H ₆ で脱脂	普通の脱脂処理	2.1	1.3	61.9
8	市販の洗滌剤で脱脂		2.7	1.3	48.2
9	15%NaOH 溶液で処理	アルカリによる水酸化物膜の除去	3.9	3.0	76.9
10	15%NaOH 溶液で2分間処理後15%HNO ₃ 溶液で中和	普通の表面処理	1.0	0.7	70.0
11	10%HNO ₃ +2.5%HF 溶液で処理	酸化皮膜の除去	1.5	1.1	73.4
12	H ₃ PO ₄ +H ₂ SO ₄ +CrO ₃ 液で電解研磨	最良の表面処理	1.0	0.7	70.0
13	外国の心線	比較のため	2.3	1.6	69.5

図—12 Al (2S) 溶接部の心線の処理と気孔率の関係

ガス。

これらのガスが溶接部の含有ガスに大きな影響を与えることは鈴木氏らと著者らの実験でも明らかである¹²⁾¹³⁾。すなわち、工業用純アルミニウム (2S) の溶接心線を各種の処理をしてガス分析をしてみると表—2に示すごとくなる。この表において明らかなごとく、処理の悪い溶接心線で溶接した溶接部は図—12に示すように溶接部の気孔率が多くなる。

わが国では溶接心線の製造工程の管理や、溶接前処理に比較的無関心であるが、溶接心線の処理および取扱いについては細心の注意が必要であることを喚起しなければならない。軽金属協会船舶用軽金属委員会では Mig. 用溶接心線について心線の表面処理の影響を現在検討しているがその結果は注目すべきであろう。

5. 溶接部に含有される水素ガスの理論

最近、ようやく金属内に含有されるガスの状態について、その機構が明らかにされ、理論的な説明が行なわれつつある。一般に金属に含有されるガスの状態は吸着 (adsorption) と吸収または溶解 (absorption or dissolution) の2つに大別される。

吸着はさらに物理的吸着 (physical adsorption) と化学的吸着 (chemical adsorption, chemisorption) または活性化吸着 (activated adsorption) にわけて考えら

れている。

物理的吸着とは金属表面に 1 分子層の厚さで、分子間力 (Van der Waals 力) により金属表面原子とガス分子が結合する状態である。物理的吸着による吸着ガスは温度と圧力に関して完全に可逆的な吸着を示す。

また、化学的吸着の場合はガスと金属の間に、ある種の化学的結合をもち、吸着するガスの状態をさすものである。この場合、吸着の状態は非可逆的であり、吸着の力も強く、かつ吸着されるガスの量も物理的吸着に比べるとはるかに多いのが特徴である。

このように吸着を考えると、実際に金属の諸性質に影響をおよぼすガスは化学的吸着により吸着されたガスによると考えるのが正しい。

しかしながら、化学的吸着によるガスはそのままの状態で金属の諸性質に影響するのではなくて、これらのガスは拡散により、金属内部に吸収または固溶されることによってはじめて金属内部に含有されるガスとなる。すなわち、アルミニウム合金に含有された水素の影響とはこのような過程を経て固溶、吸収された水素の影響ということになる。ここで溶接部に含有される水素について考えてみると、1 つは母材および心線自体に固溶する水素である。これはひとまずおくことにして、溶接施工に際して外部から入る水素を考えてみると、大気中に含まれる水素量は少ないし、かつ水素分子が解離して金属中に入るといふ考え方は水素分子の解離圧および解離温度が高いので水素が単独で原子状で固溶するということは理論的に考えにくい。現在では雰囲気中の H_2O 解離によってできる水素原子がアルミニウムに溶解すると考えるのが定説となっている。すなわち、

しかしながら、先に述べたごとく溶接時において溶着金属に溶解するまでの過程を考えることが必要である。

雰囲気中の H_2O は母材または心線表面に化学的吸着される。この場合、アルミニウム母材の表面は酸化皮膜で覆われているので、化学的吸着はアルミニウムと H_2O の吸着と考えると同時に、アルミニウム酸化物と H_2O の吸着を考えることが必要である。この場合、酸化物が結晶水をとることも考慮する必要がある。しかし、酸化皮膜をつくる要因も雰囲気中の H_2O にあることは (1) 式によって明らかである。このようにして吸着した H_2O は溶接時の熱とアークによるイオン化傾向によりアルミニウム中に容易に溶解する。なおアルミニウム中にマグネシウムがあるとき、

の反応により、 H_2O の解離は促進される。マグネシウムは溶接中に溶接表面に拡散する傾向があり、かつマグ

ネシウムはアルミニウムより活性であるから、 $[H]$ のできる量が多い。これが Al-Mg 合金で含有水素ガス量の多い第 1 の要因と考えられる。溶接時アルミニウム表面にできた $[H]$ は溶融池中に拡散するが、その拡散速度は純アルミニウムにおけるより、不純なアルミニウム、さらにアルミニウム合金の場合は大きいようである。

このようにして溶解した $[H]$ は、どのような型で金属中に存在するかについて 2 通りが考えられている。すなわち、1) endothermic な固溶と 2) exothermic な固溶である³⁾⁴⁾。

endothermic に固溶する水素は、金属格子内に浸入型として固溶する。この型に固溶する $[H]$ はエネルギーを吸収することにより安定化する傾向を有するから、温度が増加するとともに金属内における溶解量は増加する。この種の型に属する金属は Fe, Cu, Ni, Co, Cr, Mo, Ag, Pt がある。

exothermic に固溶する水素は金属との間に置換型で固溶し、低いエネルギー状態で安定化している。温度が上昇すると、安定度がくずれ、ガスを放出する傾向を有する。この種の型に属する金属は、Ti, V, W, Ce, Zr, Ta, Nb, Pd などがある。これらの金属は前者に比べるとはるかに多量の水素を溶解する。

表-3 は endothermic な固溶をする金属の水素の溶解度を示し。表-4 は exothermic な固溶をする金属の水素の溶解度を示す。

また図-13 は代表的な金属の溶解度曲線を示す。ジルコニウムは exothermic な固溶を示し、高温で溶解度は

表-3 Endothermic な固溶をする金属に対する水素の溶解度 ml/100 g

温度 °C	金属の種類							
	Ni	Fe	Co	Cr	Cu	Ag	Mo	Pt
200	1.7	—	—	—	—	—	—	—
300	2.35	0.16	—	—	—	—	—	—
400	3.15	0.35	—	—	0.06	0.055	0.165	0.065
500	4.10	0.75	—	—	0.16	0.110	0.175	—
600	5.25	1.20	0.89	0.5	0.30	0.176	0.185	0.075
700	6.50	1.85	1.22	—	0.49	0.232	0.21	—
800	7.75	2.45	1.85	1.0	0.72	0.334	0.25	0.095
900	9.10	3.0(α) 4.7(γ)	2.52	2.0	1.08	0.427	0.29	0.135
1,000	9.80	5.50	3.21	3.0	1.58	—	0.50	0.20
1,100	12.15	7.00	4.33	4.2	6.3*	—	0.62	0.35
1,200	14.25	8.25	5.44	—	8.1	—	—	0.52
1,300	14.7	10.1	—	—	10.0	—	—	0.77
1,400	16.2	10.5(γ) 10.1(α)	—	—	11.8	—	—	1.15
1,500	41.6*	—	—	—	13.6	—	—	—
1,535	—	14(δ) 25*	—	—	—	—	—	—
1,600	43.1	28.0	—	—	—	—	—	—
1,650	—	31.0	—	—	—	—	—	—

* .liquid metal

表—4 Exothermic な固溶をする金属に対する
水素の溶解度 ml/100 g

温 度 °C	金 属 の 種 類								
	Ti	V	Zr	Nb	La	Ce	Ta	Th	Pd
20	40,740	15,000	23,550	5,500	22,300	21,500	4,600	14,800	6,000
300	—	6,500	—	4,440	19,200	18,400	3,300	—	330
400	38,770	3,800	—	3,680	18,200	17,600	2,500	—	230
500	36,600	1,900	—	2,270	17,200	16,800	1,400	—	190
600	33,470	1,000	18,400	988	16,300	16,000	700	9,100	180
700	18,390	640	17,600	511	15,300	15,200	420	8,800	170
800	14,090	440	16,500	330	14,300	14,500	250	8,100	162
900	9,820	320	13,800	217	13,400	13,800	180	7,700	157
1,000	6,610	250	7,800	163	12,300	13,000	140	2,600	155
1,100	4,590	210	4,700	—	11,100	11,300	110	1,900	154
1,200	—	—	3,200	—	4,100	5,300	100	1,750	—

図—13 各種金属に対する水素の溶解度曲線

図—14 Al の [H] の溶解度

減少する。しかしながら破線で示されるように 1 部の水素は endothermic な固溶をするのであるが、その量は比較的少ないため実際には観察されない。ニッケルは endothermic に固溶する典型的な型である。マンガン、クロムはこれらの 2 つの型が重畳している。すなわち、低温では exothermic な固溶を示し、高温で endothermic な固溶を示すものである。

さてアルミニウムについては、前述のごとき過程で一応 endothermic な型によって水素を固溶するものと考えられている。図—14, 15 はアルミニウムに対する水素の溶解度を示すものである^{4,15)}。しかしながらアルミニウ

I—Ivaze
II—Bauklch and Oesterlen
III—Ransley and Neufeld
IV—Röntgen and Braun
V—Röntgen and Moller
VI—Czochralski

図—15 アルミニウムに対する水素の溶解度曲線

表—5 [H] の Al に対する溶解度

温度 °C	ml/100 g	重量 %	H/Al 比
850	2	8.4×10^{-5}	4.8×10^{-5}
660 (溶融)	0.7	2.8×10^{-5}	1.6×10^{-5}
660 (凝固)	0.04	0.17×10^{-5}	0.1×10^{-5}
	0.01	0.042×10^{-5}	0.024×10^{-5}

ム中に固溶する [H] が endothermic の型に属することは必ずしも決定的なわけではない。著者らは種々の実験から Al·H の結合を考慮すべきであると考えている。すなわち、アルミニウム中への [H] の拡散速度が大きいのに比較して、アルミニウム中からの [H] の脱ガスがきわめて困難であることを実験で経験するからである。

この反応は右へはきわめて速やかに進むが、左へは進みにくく、非可逆な反応と考えざるを得ないのである。図—14 によって明らかなように、Al においては、850 °C の溶融状態で 2 ml/100 g の水素量を溶解するが、常温では 0.01 ml/100 g 程度に減少する。これを原子比になおすと、表—5 のごとくなる。

この表でわかるごとく、固溶する平衡 [H] はきわめて少なく、他の金属にくらべてもはるかに低い値である。このような微量の平衡 [H] がアルミニウムの機械的性質その他諸性質に大きな影響を与えることは考えにくい。

* (3) 式は Al と H が 1 対 1 で結合することを示すものでなく、Al 中に存在する微量の固溶した H が Al とある種の結合を持つことを示すものである。

- A : 850°C で [H] を飽和させ、融点直上より急冷した試料
 B : 850°C で [H] を飽和させ、炉内で緩冷した試料の試料
 C : A を真空中で 750°C で高周波炉により再溶解した試料、融点直上より急冷
 D : A の試料を真空中で 750°C で抵抗炉により再溶解した試料、融点直上より急冷
 E : A の試料を空气中で 750°C で高周波炉により再溶解した試料、融点直上より急冷
 F : A の試料を空气中で 750°C で抵抗炉により再溶解した試料、融点直上より急冷
 G : F の試料と同じ再溶解試料、炉内で緩冷

図-16 99.99% Al による過冷却の実験結果

そこで著者らはアルミニウム溶接部について分析した水素量から考えて [H] は固体アルミニウム中に過飽和状態で相当量固溶すると考えている。アルミニウムの凝固点における急峻な溶解度の減少はアルミニウム特有のものであるが、(3) 式のような非可逆反応と [H] が小さい原子であることを考えれば、アルミニウム中に [H] が過飽和状態で相当量存在すると考えることは可能である。図-16はこのような過飽和状態を検討するために行なった著者らの実験である¹⁶⁾。実験に用いた試料は 99.99% の高純度アルミニウムであるが 850°C ではアルミニウム中に [H] は 2 ml/100 g 溶解するが、急冷したときはほとんどそのまま固溶する。また相当緩冷しても相当量が過飽和状態で固溶する。しかしながら、一方、気孔は急冷した試料に多く、緩冷した試料にきわめて少ない。この気孔内のガス圧を常圧と仮定すれば（実際には気孔の内圧は高いようである）、気孔として析出した水素ガス量は過飽和固溶量の 1/10~1/50 程度しかない。また真空 (10^{-2} mmHg) で脱ガスしても効果が少ないという実験結果を得たがこれは真空脱ガスというような物理的な方法ではアルミニウムから [H] を分離すること困難なことを示すものである。また真空度を 10^{-4} mmHg 程度としても溶融した [H] の脱ガスにはきわめて長い時間を必要とすることは経験的に明らかである。以上を総合すると Al-H の結合を暗示するものがある。一方、高周波溶解のように外部よりエネルギーを与える方が脱ガス効果があることもこのことを裏づけ

るものであろう。

図-17は著者らが Al-Mg 合金 (NP 5/6) の溶接部について気孔率と含有ガス量の関係求めたものである¹⁷⁾。この図からわかるごとく、Al-Mg 合金で気孔率 0 のとき [H] の含有量は 2~2.5 ml/100 g であり、純アルミニウムの場合と同様に過飽和固溶が考えられる。図-18はマグネシウム中の水素の溶解度を示すものである

図-17 Al-Mg 合金 (NP 5/6) 溶接部の気孔率と含有ガス量の関係

図-18 マグネシウム中の水素の溶解量 (Winterhager による)

図-19 溶接入熱と気孔率の関係

が、アルミニウムに比べて溶解度ははるかに大きい (Al-Mg 合金ではマグネシウムの含有量に比例して水素の溶解量が増加するのではなく、合金の水素の含有量については別に考えねばならない)。

さて一般にアルミニウムの溶解の場合に比べて、溶接の場合には気孔となった水素ガスの影響はきわめて大きいことはいうまでもない。溶接施工に際して、水分の分解によって生じた水素は溶融池中に拡散して多量の水素を溶解するが、溶融池の凝固に際して、アルミニウムに対する水素の溶解度が激減し、溶解した水素は析出して多量の気孔を生ずる。著者らはこれらの定説に加えて、アルミニウム溶接部の諸性質におよぼす水素の影響を次の2つに分けることができると考えている。

1) 溶接施工時の過冷却によって、溶解した水素は過飽和状態で凝固したアルミニウム中に固溶し、溶接部のミクロ的な諸性質に大きな影響を与える。

2) 凝固時に、過飽和量以上の溶解した水素は析出して気孔となるが、これらの気孔は当然、溶接部のマクロ的な諸性質に大きな影響を与える。

これらの考え方を検証するため著

者らは溶接施工をモデル化して一連の実験を進めつつある。この実験により現在まで次の結果が得られた¹⁸⁾。

1) 図-19はモデル化溶接実験により求めた溶接入熱と気孔率の関係であるが溶接入熱が多いとき、気孔の発生は少ない。このことは、図-4において示した著者らの実際の溶接施工の場合のガス分析の結果と一致する。この結果より、溶融池の冷却速度の影響が気孔の発生に大きく影響することが考えられ、図-11の冷却速度の影響とも一致する。

2) 図-20は溶接電流が多くなると、溶融池の温度が

図-20 溶接電流と溶融池の温度の関係

図-21 溶融池の温度と気孔率の関係

図-22 溶接部の温度の変化

いちじるしく上昇することを示している。そして図-21は溶接入熱一定の条件で溶融池の温度と気孔率の関係を求めたものであるが、溶融池の温度が高くなると、気孔の発生が多くなることを示し、溶融池の温度をあげないことが溶接施工に必要なことを示している。鈴木氏らによって得られた図-7の溶接電流と気孔数の関係は著者らの実験結果を一見反する結果になっているが、鈴木氏らの結果は実験過程において入熱一定の条件が入っていないため、溶融池の温度の影響はあらわれないで、入熱の影響があらわれているものと考えられる。

3) 図-22は溶接時の温度の時間的変化を電磁オシログラフでとったものである。1)において冷却速度が気孔の発生に影響することを述べたが、実際は溶融池の溶解されている時間が大きく影響し、冷却速度と重畳して影響を示すことが考えられる。これについて著者らはさらに実験を進めている。

6. 結 語

アルミニウム材料は原子力工業、化学工業において需要を増大している。アルミニウム材料の成形加工において溶接は欠くことのできないものである。とくに高品質の溶接は今後強く要望されることになろう。溶接部の含有ガスは原子炉で使用される場合、中性子照射により活性化され、各種の影響があらわれることが考えられる。また含有水素と残留応力の関係も今後明らかにされねばならない。

このようにアルミニウム合金材料の溶接における気孔

の問題を解明するためにはいくつかの基礎的研究を積み重ねねばならないと考えている。

7. 参 考 文 献

- 1) Smishells et al: Gases and Metal (1937), Book
- 2) Smith, D.P. et al: Hydrogen in Metals (1948), Book
- 3) Smith, D.P. et al: Gases in Metals (1953), Book
- 4) Sokolskay, L.I.: Gases in Light Metals (1961), Book
- 5) Koziarski, J.: Weld. J. Vol. 36 (1957) p. 141
- 6) Collins, F.R.: Weld. J. Vol. 37 (1958) p. 589
- 7) Daley, D.M.: Weld. J. Vol. 39 (1960) p. 301 S
- 8) Koziarski, J.: Weld. J. Vol. 32 (1953) p. 970
- 9) 安藤, 藤村, 生田目: 溶接学会誌 Vol. 29 (1960) p. 326
- 10) Westendorp R.G.: B. Weld. J. Vol. 8 (1961) p. 310
- 11) 日本溶接協会 AX 委員会: 溶接技術 Vol. 8 (1960) No. 10
- 12) 安藤, 藤村, 中崎, 生田目: 溶接学会誌 Vol. 29 (1960) p. 730
- 13) 鈴木, 村瀬: 溶接学会誌 Vol. 25 (1956) p. 618
- 14) 日本溶接協会原子力委員会: 昭和32年度科学技術庁原子力平和利用委託研究報告 (溶接技術に所載)
- 15) Ransley, C.E. et al: J. Inst. Metals Vol. 74 (1948) p. 599
- 16) 岩村, 藤村: 日本金属学会秋季講演会 (1960)
- 17) 安藤, 藤村, 生田目, 中崎: 溶接学会誌 Vol. 29 (1960) p. 872
- 18) 安藤, 藤村, 中崎: 溶接学会誌 Vol. 31 (1962) p. 980

(書 評)

『最新溶接ハンドブック 増補版』

工博 鈴 木 春 義 著
理博

山 海 堂 発 行 昭和37年12月 定価 2,800円

「最新溶接ハンドブック」は斯界の名著として各方面に定評があるが、このたび炭酸ガスアーク溶接の画期的な発展に呼応して、この分野の詳細な技術資料を増補し、増補版の刊行をみたことは誠に時宜を得た企てである。本書の増補版では各種炭酸ガスアーク溶接法の利点、特性、装置、施工法、溶接部の性質、安全衛生、経費などの全項目について公平かつ平易に解説されており全く申し分のない内容である。

従来ハンドブック類の単独著作はほとんどその例を見ないので、よくもこれまで溶接技術の精髓を明快に整

理され首尾一貫した無駄のない豊富斬新な内容に仕上げられたものと感歎している。この大名著には著者の高邁な学識、風格がにじみ出ており、活字を通して直接私どもを懇切に教示している。本書はあらゆる溶接関係者が広く座右の銘として必読される価値のあるものとして推薦する次第である。(稲垣道夫)

「備考」

山海堂(東京都新宿区細工町15)へ学会誌書評で知った旨記入し直接申込み分に限り特典扱い(期限:学会誌掲載日より2ヶ月以内)される。