溶接技術の進歩と展望

小林 卓 郎*

1. 緒 言

最近における溶接技術は、新しい溶接法の出現、溶接の機械化、自動化、高能率化、溶接の適用範囲の拡大、溶接部の信頼性向上、溶接用各種金属材料の開発等あらゆる面から目ざましい発展を遂げた。前世紀末あるいは今世紀初頭、アーク溶接法、電気抵抗溶接法、ガス溶接法で始まったが、近代工業技術としての地位を得たのは比較的新しい。1950年前後からは新しいエネルギー源あるいは新しい原理による溶接法が多数出現し、現在使用されている溶接法の数30を越えるといわれている。今日では原子力を除いて、考えられるほとんどのエネルギーが溶接に利用されているといえる状況である。しかし、最も簡便に行なえるアーク溶接法の使用比率が大きい現状は、ここ当分は続くものと考えられる。

表1はバトン電気溶接研究所所長のバトン教授が、溶接法を融接法(ガス溶接法、アーク溶接法、エレクトロ・スラグ溶接法等であるが大部分はアーク溶接法)、電気抵抗溶接法、新溶接法(電子ビーム溶接法、レーザー溶接法、固相接合法など比較的新しい溶接法)に大別して、ソ連における現状と将来を予測した結果である⁽¹⁾。他国においてもほぼ同様な傾向を示すものと考えられる。アーク溶接法の使用比率が将来若干下ることは予想されるが鉄鋼生産量のほぼ50%が溶接構造用に使用されるものとすれば、鉄鋼生産量が曲折はあるにしても将来増えることを考えると、アーク溶接法の適用は将来とも減らないといえるであろう。同時に、新しい溶接諸法の適用が比率、量ともに増えることは確かであろう。

表1 溶接法の使用比率⁽¹⁾(%)

年	融接溶接法	抵抗溶接法	新溶接法
1970	69.1	27.1	3.8
1975	66.1	29.9	4.0
1980	62.9	32.6	4.5
1990	57.9	35.5	6.6
2000	53	39	8

* 東北大学教授；工学部金属加工学科
Past and Future of Welding Technology ; Takuro Kobayashi (Department of Metal Processing, Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai)
1977年8月15日受理

したがって、本稿では、主としてアーク溶接法に重点を置き、しかも金属工学の狭い分野からみた若干の進歩の跡および将来の展望について述べてみたい。

2. 溶接用材料の進展

溶接構造用に高張力鋼が用いられたのはかなり古いが、溶接性の良い高張力鋼材が多数開発されたのは1950年代以降である。炭素当量の概念、鋼のC.C.T.図、各種の溶接性試験等が溶接用高張力鋼の開発に大きな寄与をした。また破壊力学の進歩が、溶接用高張力鋼の巨大構造物への適用に大きく寄与した。製鋼技術の進歩に負うところも大きい。表2はわが国で開発された50~80 kg/mm²級溶接用高張力鋼の例を示す⁽²⁾。炭素当量を著しく低くして、溶接割れが発生し難いものとか、V、Ti等を少量合金して大入熱溶接を行なっても溶接ボンド部近傍が脆化し難いものとか、超低硫黄含量にし特殊処理を施してラメラ・テアをおこり難くしたもの等、多くの工夫がみられる。

引張強さ80 kg/mm²級程度までの高張力鋼は溶接用として多用されているが、それ以上の強度のものは限定された用途にのみ使用されるというのが現在における実状であろう。極度に管理された施行であれば、勿論さらに高強度の高張力鋼の溶接も可能であるが、一般的には、現在程度の材料であればこの辺が境界であろう。

強度の高い高張力鋼だけでなく、特殊用途の鋼材の開発およびその溶接も最近大きく進展した。種々の低温用鋼の開発とその溶接性についての研究の進展などはその好例であろう。

かつて、溶接は容易でないとされていたアルミニウムおよびアルミニウム合金の溶接もTIG、MIG法の出現とともにその溶接は容易な部類に入った。パルス付加のTIG、MIG法、あるいは電子ビーム溶接法等の適用により、さらに好結果が期待されている。その他、チタンおよびチタン合金；ジルコニウムおよびジルコニウム合金；タングステン、モリブデン、タンタル等の高融点金属等の溶接もTIG、MIG溶接、電子ビーム溶接あるいは固相接合等の技術の進展とともに可能になり、着実に進展している。

表2 日本における最近の溶接用高張力鋼の代表例⁽²⁾.

名 称		化 学 成 分 (%)											
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb
HT 50	5 A SM 50 C	0.14	0.46	1.41	0.021	0.017	—	—	—	—	—	—	—
	5 B HT 50 CF	0.05	0.26	1.15	0.016	0.013	—	—	—	—	—	0.01	—
	5 C HT 50 S	0.12	0.27	1.48	0.013	0.008	—	—	—	—	0.03	0.01	—
	5 D HT 50 L	0.14	0.42	1.40	0.006	0.002	—	0.12	—	—	0.05	—	0.03
HT 60	6 A HT 60	0.13	0.44	1.10	0.017	0.006	—	—	0.23	0.15	0.03	—	—
	6 B HT 60 CF	0.06	0.22	1.31	0.012	0.005	—	—	0.16	0.16	0.03	—	—
	6 C HT 60 S	0.13	0.25	1.46	0.019	0.004	—	—	—	—	0.04	0.01	—
	6 D HT 60 R	0.15	0.45	1.25	0.018	0.007	—	—	0.22	—	0.06	—	—
HT 80	8 A HT 80	0.13	0.24	0.75	0.013	0.010	0.25	0.94	0.55	0.40	0.05	—	—
	8 B HT 80 B	0.13	0.26	0.85	0.017	0.006	0.26	1.20	0.53	0.43	0.04	—	—
	8 C HT 80・OP	0.11	0.27	0.86	0.013	0.004	0.24	0.88	0.54	0.44	0.05	—	—
	8 D HT 80 C	0.11	0.26	0.93	0.014	0.006	0.27	—	0.78	0.48	0.10	—	—
	8 E HT 80 P	0.12	0.32	1.35	0.015	0.004	—	—	—	0.61	—	—	0.03
	8 F HT 80 S	0.09	0.58	1.30	0.008	0.003	0.12	1.05	1.00	0.50	0.04	0.02	—
名 称		化 学 成 分 (%)				熱処理	板厚 (mm)	引張り試験			V- シャルピー		
		B	C _{eq.} (WES)	C _{eq.} (IIW)	P _{CM}			降伏点	引張り 強さ	伸び	吸 収		Trs
											エ ネ ル ギ ー	°C	
HT 50	5 A SM 50 C	—	0.40	0.38	0.23	N	30	354	529	27	86	-20	-23
	5 B HT 50 CF	—	0.25	0.24	0.12	Q	30	333	512	24	147	-20	-20
	5 C HT 50 S	—	0.38	0.37	0.21	N	32	342	512	29	175	-40	-40
	5 D HT 50 L	—	0.39	0.39	0.22	N	64	385	539	35	219	-20	-50
HT 60	6 A HT 60	—	0.42	0.40	0.22	Q	38	552	639	29	196	-40	-72
	6 B HT 60 CF	—	0.36	0.35	0.16	Q	38	565	629	27	167	-40	-41
	6 C HT 60 S	—	0.39	0.38	0.22	Q	25	561	649	34	211	-40	-63
	6 D HT 60 R	—	0.43	0.41	0.25	R	20	489	617	26	63	-0	-6
HT 80	8 A HT 80	0.0020	0.49	0.53	0.26	Q	25	834	865	26	147	-35	-75
	8 B HT 80 B	0.0010	0.53	0.57	0.27	Q	75	785	843	26	156	-35	-95
	8 C HT 80・OP	0.0016	0.51	0.53	0.25	Q	36	751	806	25	196	-35	-69
	8 D HT 80 C	0.0010	0.56	0.57	0.26	Q	36	767	821	24	177	-35	-74
	8 E HT 80 P	0.0013	0.51	0.47	0.27	Q	36	773	812	24	159	-35	-71
	8 F HT 80 S	—	0.68	0.69	0.28	Q	36	763	818	26	216	-35	-92

記号 (a) CF: 耐割れ用, S: 大入熱用, L: 耐ラメラテア用, R: 圧延のまま, B: 橋梁用, OP: ペンストック用

$$(b) C_{eq.}(WES)(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}$$

$$C_{eq.}(IIW)(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5}$$

$$P_{CM}(\%) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

(c) 熱処理 N: 焼きならし, Q: 焼入れ焼きもどし, R: 圧延のまま

3. アーク溶接技術の進展の跡

緒言で述べたように, 多くの溶接法が実用されている中で, アーク溶接法が用いられる比率は大きい. その理由は本来簡便であることによるものと考えられるが, 進展の過程で, 溶接部の品質向上, 溶接の高効率化, 機械化, 自動化等の絶えざる努力がなされた結果でもあろう. したがって, アーク溶接技術の進展は, そのような観点から捕えるのが本筋であるが, ここでは, 金属工学

の立場から, しかもその中でも狭い観点から, アーク溶接技術の進展の一側面を捕えてみたい.

アーク溶接法は, 裸金属アーク溶接法に始まり, 被覆金属アーク溶接法, サブマージ・アーク溶接法, ガス被包アーク溶接法, セルフ・シールド・アーク溶接法等が開発され現在に至っている. これを, 金属工学の一側面からみると, N₂, O₂, H₂等のガスとの関いの歴史とみる事ができる. すなわち, 前世紀末期に始まった裸金属アーク溶接では空気中の N₂, O₂ が多量に吸収され, 溶

接金属の性質は劣悪であった。1920 年前後に被覆溶接棒が出現し、改良が加えられ、今日に至っているが、その間 1940 年代に低水素系被覆溶接棒が開発された。水素に対する闘いの一つの成果であった。被覆金属アーク溶接法は、機械化、高能率化に不適なために、1930 年代にサブマージ・アーク溶接法が、1950 年前後に消耗電極ガス被包アーク溶接法が出現した。また、1960 年代にセルフ・シールド・アーク溶接法が出現した。いずれも、ガスとの闘いの成果である。その闘いは今日なお続いている。したがって、将来の闘いの成果もさらに期待できる。

以下、アーク溶接における金属とガスの問題についての知見の二、三を紹介し、アーク溶接技術進展の一側面を示したい。

(1) H_2 の問題

裸金属アーク溶接の時代には水素の問題はほとんど無かった筈である。被覆溶接棒が出現してから、水素による問題が出てきた。最初に銀点(fish-eye)、続いて溶接割れなどである。水素に起因する溶接割れは図 1⁽³⁾に示すように、遅れ破壊の形態をとるが、200°C 程度以下、-70°C 程度以上の温度範囲でおこるもののようである。溶接割れの重要因子として H_2 が注目され始めたのは 1940 年頃であるが、以来今日に至るまで約 30 年間にわたる研究の成果は、その影響が定量的に評価できるようになったことであろうか。図 2⁽⁴⁾に拘束溶接割れ試験片を用いた場合の鋼材のルート割れ感受性指数 P_W と 300°C から 100°C までの臨界冷却時間との関係を示している。 P_W は

図 1 ビード・オン・プレート溶接割れ試験において、溶接後の保持温度、保持時間と溶接割れ発生との関係⁽³⁾。
(a) 80 kg/mm² 級高張力鋼、ビード下割れ
(b) Ni-Cr 鋼、トウ・クラック
○：割れ発生せず，△：微小割れ，×：割れ

図 2 拘束溶接割れ試験結果⁽⁴⁾ (入熱 30,000 J/cm, 断面における割れ長さ。

○：0%，×：1～10%，●：11～50%
▲：51～100%

$$P_W = P_{CM} + \frac{[H]}{60} + \frac{K}{40000}$$

$$P_{CM} = \text{炭素当量} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$[H]$ = 溶接金属の水素量 (cc/100g)

K = 溶接継手の拘束度 (kg/mm・mm)

で示される。溶接割れにおよぼす H_2 の影響が定量的に示された一例である。

高強度の高張力鋼が溶接構造用に使われる傾向が増大するにつれ、溶接部の水素脆性、溶接割れなどを防止するために超低水素の溶接金属を得ることが今後の一つの課題である。また水素の拡散をコントロールすることが将来の一つの命題となり得るであろう。

(2) O_2 の問題

裸金属アーク溶接の時代には溶接金属の O_2 量は 0.2% 前後と著しく高かった。被覆溶接棒が出現し、被覆剤中に脱酸剤が添加使用されるに至って O_2 量は数分の一に低下した。しかし、今日でも良質の鋼材に比べると約一桁高い。

サブマージ・アーク溶接金属、 CO_2 アーク溶接金属などの O_2 含量もかなり高いのが普通である。 CO_2 アーク溶接に際しての溶接金属の O_2 含量を、Mn-Si による共同脱酸の平衡値に比べると約 10～15 倍になっている。急速な凝固過程では脱酸生成物の浮上分離が容易でないことを物語るものであろう。したがって、溶接金属の O_2 含量をさらに低下させるには、脱酸も勿論重要であるが、さらに原点に戻って酸素の吸収量を下げる努力が必要である。図 3 はサブマージ・アーク溶接金属の O_2

量がフラックスの塩基度によって低下する一例を示している⁽⁵⁾。高塩基性フラックスの場合はフラックスの解離に基く O_2 が少なくなるためであろう。図 4 は、 CO_2 アーク溶接の場合の電極線先端で溶滴が生成し成長する過程での O_2 吸収状況を示しているが⁽⁶⁾、電極線先端で極く短時間に多量の O_2 を吸収することおよび極く短時間内でも脱酸反応が進むことがわかる。この結果は、また、電極線先端に溶滴を長時間留めないことが O_2 吸収を少なくし得る一つの手段になり得ることも示唆している。

アーク溶接金属の O_2 含量を下げることは古くからの命題であったが、今日なお完全には解決されていない。材料、プロセス両面から将来ともなお追求を要する課題である。

図 3 サブマージ・アーク溶接金属の酸素量に
およぼすフラックスの塩基度 B_L の影
響⁽⁵⁾。

図 4 Si 含有電極鋼線先端溶滴成長段階にお
ける酸素含量変化⁽⁶⁾。

(3) N_2 の問題

裸金属アーク溶接金属では O_2 含量が高いと同時に N_2

含量も異常に高かった。何故異常に多量の N_2 が吸収されるかについて究明の努力がなされたのは比較的最近で、図 5 はそれに関連した筆者らによる結果である⁽⁷⁾。 O_2 - N_2 、 CO_2 - N_2 等含 N_2 酸化性雰囲気の場合溶接金属の N_2 含量が異常に高くなることがわかる。フラックス、被包ガス等で大気からの N_2 の侵入は比較的容易に防げるが、これらを使用しないで、機械化アーク溶接を行なう努力が 10 数年来なされてきた。セルフ・シールド・アーク溶接法がそれである。現在普遍的に用いられているのは、複合ワイヤ (cored wire) を用いる方法で、内部に脱酸剤、脱窒剤、ガス発生剤、スラグ造成剤等を詰めたワイヤを使用している。筆者は、空气中アーク溶接に際しての N_2 吸収におよぼす諸因子の影響の検討から、Ti, Zr を合金元素として含有する特殊鋼線の表面にアルミニウム合金の薄被覆を施したソリッド・ワイヤを用いるセルフ・シールド・アーク溶接法を提案した⁽⁸⁾。それによると、図 6 に示すように N_2 吸収を低下させ、しかも吸収された N_2 の大部分を TiN の形に固定する

図 5 各種含窒素雰囲気中でアーク溶接 (260 A, 24 V) した軟鋼溶接金属の窒素含量⁽⁷⁾。

図 6 Ti, Zr 含有ワイヤ (裸およびアルミニウムコーティングを施したもの) を用い空气中でアーク溶接した溶接金属の窒素含量⁽⁸⁾。

ことにより可溶性 N_2 量を下げ、気孔の無い溶接金属が得られる。 O_2 量も低く機械的性質もある程度のものが得られるが、未だ実用されていない。

アーク溶接法を最も簡易化した理想的な姿は、フラックスも被包ガスも使用しないで空気中に行なえるセルフ・シールド・アーク溶接法である。それに到達するには N_2 との闘いがさらに必要である。

4. 高エネルギー密度融接技術の進展

熔融溶接の理想は、接合局部を必要最小限に融合させることである。高エネルギー密度の熱源を用いると、この理想に近づくことが可能である。プラズマ・アーク溶接法は通常のアーク溶接のエネルギー密度をやや高めたもので、比較的薄物の溶接に有効に利用されている。表3に現在用いられている各種溶接熱源の出力密度を示している⁽⁹⁾。1960年前後から溶接熱源として利用され始めた電子ビームおよびレーザーは出力密度が高く、これらによると、理想に近い形の融接が可能であることが予想される。エネルギー密度が高いと、(1)溶接部の幅が狭く、溶接変形が極めて小さい、(2)溶接熱影響の範囲を局限できる、等の特徴がでてくる。

表3 各種溶接熱源の出力密度⁽⁹⁾。

溶 接 熱 源		出 力 密 度 (W/cm ²)
ガス炎 ($O_2-C_2H_2$)		10^3
アルゴンアーク (200 A)		1.5×10^4
電子ビーム	パルス	$\geq 10^7 \sim 10^8$
	連 続	$10^6 \sim 10^9$
レーザービーム	パルス	$10^7 \sim 10^{13}$
	連 続	$10^5 \sim 10^9$

電子ビーム溶接法は最初、小容量の装置で小物の溶接から始まったが、現在では、大容量(100 kW 以上)の装置が開発され、超厚物の溶接にも威力を発揮する段階に到達した。たとえば、200 mm 程度の厚板を旧来のアーク溶接法で接合しようとするとき極めて多くのパス数の溶接が必要であるが、大容量電子ビーム装置によると僅かに表裏2パスで溶接することができるなど、その威力は大きい。

電子ビーム溶接では、真空を要するため、真空室の大きさの関係から大きな構造物を溶接するには制約があった。しかし、最近では溶接局部のみを真空にする部分真空電子ビーム溶接法あるいは溶接物を大気中に置いて電子ビーム溶接する大気中(non-vacuum)電子ビーム溶

接法等の開発が進んでいるので、大きな構造物にも電子ビーム溶接法が適用できる日も遠くないであろう。

しかし、溶接用母材の多くが、大気中溶解を出発点としている現状からすると、これを、たとえ、局部的に短時間にしろ真空中で再熔融するのであるから、電子ビーム溶接法の場合にも材料面から解決を要する問題も出てくることが予想される。ここでも、ガスとの闘いが予想される。

5. 固相接合技術の進展

固相接合法には、冷間圧接、鍛接、超音波溶接、摩擦溶接、拡散溶接、爆発接合など多くの形態がある。鍛接などの固相接合技術の歴史は古いが、近代的工業技術としての固相接合技術の歴史は比較的新しい。最も多く用いられているのは摩擦溶接で、他は特殊な場合に用いられる。固相接合では、マクロ的な溶融現象は伴わないので、融接に随伴する諸問題すなわち凝固収縮、変析、凝固過程における割れ等の問題は回避できる。また異種金属の溶接に適する。これらの特徴を有するので、将来適用範囲は拡大されるであろうが、近い将来に融接法を凌ぐというようなことは考え難い。

6. 水中溶接の進展

水中溶接、切断技術は決して新しいものではない。サルベージ、あるいは修理のために古くから行われていた。しかし、海洋開発特に海底油田の開発のために、水中溶接、切断技術への要望が急激に高まってきた。被覆金属アーク溶接、ガス被包アーク溶接、摩擦溶接その他の溶接法を使用しての水中溶接の報告が最近多くみられる。国際溶接学会(IIW)でも Underwater welding の study group を作り研究を始めている。溶接雰囲気圧の影響、急冷の影響、水素の問題等難問が多い。

宇宙空間での溶接は1969年ソ連がソユーズ6号を使って、ステンレス鋼、チタンおよびアルミニウム合金の溶接、切断実験を始めて行ない、本質的な困難さはないことを示したが、宇宙空間では無重力、真空、低温等の条件で、溶接にとってはむしろ好ましい場合もあるのに対し、水中溶接技術は新しい技術ではないものの、きわめてか酷な状況下での作業である。信頼性の高い水中溶接技術を確立するには、さらに多くの基礎研究が要請される。

7. 溶接の自動化の進展

現在までにも、溶接の機械化はかなり進んできたが、自動化は未だごく僅かである。将来は、コンピューターを使って、溶接作業の自動化が進むであろうし、さらに

溶接現象，溶接過程での冶金反応，熱影響等の予測，コントロールも可能になってくるであろう。

8. 安全・衛生の問題

感電，光，騒音，ヒューム等溶接切断作業には安全・衛生上の問題が多い。これらの規制が，ここ数年来，国際的にも重大な話題となっている。有害なヒュームの発生の少ない被覆溶接棒の開発，換気装置の完備などで，溶接の作業環境も次第に改善されてくるであろう。

9. 結 び

溶接冶金学を専攻する筆者が，極端に狭い立場から溶接技術の進展の大略を眺めたもので，多くの重要な事項の記述が抜けていることに対し，重ねて御寛容をお願いし，結びとします。

文 献

- (1) B.E.Paton : Prospects of welding development, Commemorative lecture to mark 25 th anniversary of the IIW, (1973).
- (2) H.Suzuki : Recent Japanese High Strength Steels for Large Welded Structures, Public Session, (1976), Annual Assembly of the IIW.
- (3) T.Kobayashi and I.Aoshima : Toe and Underbead Cracking in Low-Alloy Steels, Trans.J.W.S., **2**(1971), 70.
- (4) K.Satoh, S.Matsui, Y.Ito and K.Bessyo : Determination of preheating conditions to avoid weld cracking in steel constructions, J. J.W.S., **41**(1972), 34.
- (5) 寺島久栄 : 高張力鋼サブマージ・アーク溶接材料開発の基礎的研究, (1977).
- (6) 小林卓郎, 桑名 武, 木口立而, 斎藤晃一 : CO₂ アーク溶接の溶滴生成過程における電極線先端での合金元素の挙動, 溶接学会講演概要, 第 20 集, (1977), 92.
- (7) T.Kobayashi, T.Kuwana and Y.Kikuchi : Arc atmosphere and nitrogen content of weld metal, Weld. in the World, **5**(1967), No.2, 58.
- (8) T. Kobayashi : High current non-shielded arc welding, IIW Doc.XII-417-68.
- (9) 荒田吉明 : レーザ溶接と熱加工, 溶接学会誌, **40**(1971), No.12, 5.