

溶接工学

荒田吉明
編著

朝倉金属工学シリーズ

朝倉書店

■ 編 集 者

東京大学名誉教授・工学博士 橋 口 隆 吉
京都大学教授・工学博士 村 上 陽 太 郎
東北大学教授・工学博士 大 谷 正 康

朝倉金属工学シリーズ
溶 接 工 学

価 3500 円

1980 年 3 月 15 日 初版第 1 刷

編著者	あら 荒	た 田	よし 吉	あき 明
発行者	朝	倉	鑛	造
発行所	株式会社	朝 倉 書 店		
	東京部新宿区新小川町 2-10			
	郵便番号	1 6 2		
	電話	0 3 (2 6 0) 0 1 4 1		
	振替口座	東京 6-8673 番		

〈検印省略〉

© 1980 〈無断複写・転載を禁ず〉
3357-271303-0032

中央印刷・渡辺製本

執 筆 者

大阪大学溶接工学研究所教授・所長・工学博士	荒 田 吉 明
科学技術庁金属材料技術研究所部長・工学博士	稲 垣 道 夫
大阪大学溶接工学研究所教授・工学博士	岩 本 信 也
大阪大学溶接工学研究所教授・工学博士	松 田 福 久
大阪大学工学部溶接工学科教授・工学博士	西 口 公 之
慶応義塾大学工学部機械工学科教授・工学博士	蓮 井 淳
芝浦工業大学金属工学科教授・工学博士	橋 本 達 哉
(株)神戸製鋼所部長・工学博士	叶 野 元 巳
大阪大学溶接工学研究所教授・工学博士	圓 城 敏 男
大阪大学溶接工学研究所教授・工学博士	岡 本 郁 男
大阪大学工学部溶接工学科教授・工学博士	丸 尾 大
(株)田中製作所常務取締役・工学博士	中 西 実
大阪大学溶接工学研究所教授・工学博士	上 田 幸 雄
川崎重工業(株)溶接研究室・工学博士	松 井 繁 朋

(執筆順)

は し が き

「溶接技術」は、現在の高度な生産性工業発展の基盤をなすものであり、ほとんどすべての構造物あるいは製品の生産過程の基幹技術として重要な役割を果たしている。巨大構造物から微細なエレクトロニクス部品に至る広い領域のそれぞれの分野で、より高度な技術的、経済的課題が山積しているため、これに対応できる高精度高能率の溶接技術の開発と新しい展開が希求されている現状である。

「溶接工学」は、このような溶接技術展開の基盤と指針を与えるものでなければならない。しかも溶接工学は、理学・工学の各領域における各種専門分野の融合した典型的な学問である。このような観点に立って、本巻では、新しい「溶接工学」としての体系化を試みた。

すなわち、溶接技術の発展が、溶接エネルギーの発見と、付随する溶接法の開発によってもたらされた歴史的背景から、従来のように個々の溶接法ではなく、溶接エネルギーの種類によって、現在の溶接工学を再構築しようと試みたわけである。

溶接法の開拓には、並行して常に新しい工業材料の開発があったわけで、材料と接合法とのきびしい対決の中から新しい溶接法と新しい材料が相前後して開発されるケースが極めて多いのである。多種多岐の溶接法のなかで、材料に最も適合するものを選択して、各種の溶接構造物、溶接部材などの「溶接体」を生産することが、現在の溶接技術のソフトウェアの重要な領域でもあるので、溶接エネルギーの種類に立脚して一貫した体系化は、新しい溶接工学の総合的な理解に大いに役立つものと確信している。

このような溶接工学では接合のみでなく、切断あるいは表面処理もその領域に包含している。これらを総合して溶接生産が行われ、その過程で技術管理手法が重要となる。したがって上記の領域は章を改めて編さんした。

幸い出版にあたり，各章節を分担執筆された各位のご理解を得て，相互の内容の検討に始まり，査読・校正に至るまで多大のご協力を得た．ここに記して謝意を表する．

本巻が朝倉金属工学シリーズの刊行のなかで斯界の発展にいささかでも寄与できれば望外の幸いである．

1980年1月

荒 田 吉 明

目 次

序 説	1
I. 溶接工学と溶接法	2
1. 溶接技術の発達	2
1.1 溶 接 の 特 徴	2
1.2 溶接の重要性	4
1.3 溶接法の開発	5
2. 溶接工学と溶接法	10
2.1 溶 接 の 原 理	10
2.2 溶接工学の特異性	11
2.3 溶接熱源と溶接法	13
3. 溶 接 法 概 論	15
3.1 溶接法の分類	15
3.2 各種溶接法の概要	16
3.3 熱 切 断 法	21
演 習 問 題	22
II. 溶 接	24
A. 電磁氣的エネルギー (1)	24
1. アーク溶接	24
1.1 アーク溶接法の基礎	24
1.2 溶 接 金 属	30

1.3 溶接熱影響部	36
1.4 溶 接 割 れ	42
1.5 溶接継手の強度とボンド部の切欠きじん性	47
2. プラズマアーク溶接	51
2.1 原 理 と 特 徴	51
2.2 溶 接 装 置	53
2.3 溶接条件と継手の性質	56
2.4 応 用	58
3. エレクトロスラグ溶接	59
3.1 原 理 と 特 徴	59
3.2 溶接装置と溶接材料	60
3.3 応 用	62
4. その他のアーク溶接	62
4.1 エレクトロガスアーク溶接	62
4.2 水中アーク溶接	63
演 習 問 題	65
参 考 文 献	67
B. 電磁気的エネルギー (2)	69
1. 電子ビーム溶接法	69
1.1 原 理 と 特 徴	69
1.2 溶 接 装 置	71
1.3 溶接条件選定上の諸問題	71
1.4 溶接部の諸性質	75
1.5 最 近 の 技 術	78
2. レーザ溶接法	80
2.1 特 徴 と 種 類	80
2.2 レーザ溶接	83

2.3 レーザ切断	84
3. 光ビーム溶接法	85
3.1 太陽光線ビーム溶接	85
3.2 ランプ光線ビーム溶接	86
演 習 問 題	87
参 考 文 献	87
 C. 電磁気的エネルギー (3)——抵抗溶接法	89
1. 概 要	89
2. スポット溶接法	90
3. プロジェクション溶接法	97
4. シーム溶接法	98
5. アブセット溶接法	101
6. フラッシュ溶接法	103
7. 高周波溶接法	105
8. パーカッション溶接法	107
演 習 問 題	107
参 考 文 献	109
 D. 機械的エネルギー	110
1. 機械的加圧の意義	110
2. 鍛 接	111
3. ガ ス 圧 接	112
4. 摩 擦 圧 接	114
4.1 原 理 と 装 置	114
4.2 圧 接 部 の 性 質	118
4.3 摩 擦 圧 接 法 の 特 色	118
5. 常 温 圧 接 法	120

5.1 原理と特徴	120
5.2 溶接装置および溶接例	120
6. 超音波溶接法	123
6.1 原理と特徴	123
6.2 溶接条件および溶接例	124
7. 高周波溶接法	126
7.1 原理と特徴	126
7.2 高周波溶接の種類	127
8. 電磁圧溶接法	130
8.1 原理と特徴	130
8.2 溶接装置および溶接例	131
演習問題	131
参考文献	132
E. 化学反応的エネルギー	133
1. ガス溶接法	133
1.1 酸素-アセチレン溶接法	133
1.2 溶接方法	135
1.3 各種金属の溶接	136
2. テルミット溶接法	137
2.1 原理と特徴	137
2.2 溶接用機材	138
2.3 応用	139
3. 爆発圧接	140
3.1 原理	140
3.2 特徴	141
3.3 応用	142
演習問題	142

参 考 文 献	143
F. 結晶エネルギー (1)——拡散溶接	143
1. 拡散溶接の概説	143
2. 拡散溶接の特徴	145
3. 拡散溶接における溶接過程	145
4. 拡散溶接における諸因子	146
5. インサート金属の利用	150
6. 種々の金属の拡散溶接	152
7. 拡散溶接に用いられる装置	153
8. 拡散溶接の応用	155
演 習 問 題	155
参 考 文 献	156
G. 結晶エネルギー (2)——ろう付	157
1. むれについて	158
1.1 熱力学的な見方	158
1.2 原子論的な見方	159
1.3 相互溶解とむれ	163
2. 流 れ	164
2.1 無限平行 2 板間隙内の流れ	164
2.2 平板上の流れ	165
演 習 問 題	166
参 考 文 献	166
Ⅲ. 表 面 処 理	167
1. 溶 射 法	167
1.1 溶 射 装 置	167

1.2 溶 射 材 料	172
1.3 溶 射 の 施 工	172
1.4 プラズマ溶射の機構	174
1.5 溶射皮膜の特性と応用例	178
2. 肉 盛 溶 接	181
2.1 肉盛溶接材料	182
2.2 肉盛溶接の施工例	182
演 習 問 題	186
参 考 文 献	186
 Ⅳ. 熱 切 断	188
1. ガ ス 切 断	189
1.1 ガス切断の原理	189
1.2 切 断 機 構	190
1.3 切断に及ぼす諸因子	193
1.4 切断速度と品質	198
2. プラズマ切断	200
2.1 プラズマ切断の原理	200
2.2 プラズマトーチの形式	201
2.3 プラズマ切断の切断能力	202
2.4 動 作 ガ ス	203
2.5 切断部の性質	203
3. そ の 他	204
3.1 陽極式ウォータージェット切断	204
3.2 レーザガス切断	204
演 習 問 題	206
参 考 文 献	206

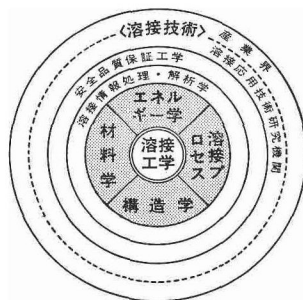
V. 溶接法の適用	208
1. 溶接構造の要点	208
1.1 溶接による応用と変形	208
1.2 溶 接 変 形	215
2. 溶接設計とその施工	221
2.1 溶 接 設 計	222
2.2 溶 接 施 工	228
2.3 溶接施工の実際	237
参 考 文 献	241
索 引	243

序

説

溶接技術はここ数十年の間に急速に進歩し、組立生産技術の主力を構成するまでに発展している。大洋をめぐる巨大船や深海艇、海をまたぐ長大橋、陸にそびえ立つ超高層ビルや大型タンク、あるいは精巧さを生命とする宇宙飛行体などの花形構造物はもちろんのこと、コンピュータにシンボライズされているように繊細で緻密さを要する電子部品構成に至るまで、もはや溶接を無視して成り立つ近代工業は皆無といってさしつかえないほどあらゆる分野に浸透し、活用されている。

このように現代加工技術の基幹をなす溶接技術は日進月歩であるが、これは溶接工学によって支えられ、また展開されている。溶接工学は理学（物理、化学）、工学（特に電気工学、材料工学、造船工学、機械工学、建築工学、原子力工学、土木工学、エレクトロニクス）など、各種分野における専門家によって構成されるトータルシステムのもとで体系化され、確立された本格的な学際的学問形態である。最近、学際的学問の重要性が叫ばれているが、「溶接工学」のように真に各種学問の融合に成功した例は極めて少ない。溶接工学は溶接エネルギー学、溶接材料学、溶接構造学、溶接プロセスの四つの大きな分野に分けられるが、これらはそれぞれ独立したものではなく、相互に密接に関連しており、溶接安全品質保証学および溶接情報処理、解析学を共通の基盤として一貫して取り扱う必要があるところに学際的な学問体系としての本質的な特徴を見出すのである。本書はこの起旨に沿うように一貫して構成されており、これがまた本書の特徴となっている。



溶接工学体系と溶接技術

I. 溶接工学と溶接法

溶接エネルギー（あるいは熱源）の選択は「溶接体」としての構造体あるいは部品の形状や材質，さらには経済性を考慮しながら決定される．また，同じ溶接エネルギーを同じ溶接体に適用する場合でも，その適用の仕方はいろいろ考えられる．すなわち，実際にはこの適用技術の問題が重要となる．このようないろいろの問題を含めて，現実には活用できる新しい溶接法が開発されることになる．さらに，この溶接法の施行によって実用可能な新しい溶接体が次々に誕生することになる．極言すれば，溶接法は溶接体をすべての面で現実に保証するものでなければならない．したがって，溶接工学は溶接法の開発とその展開の基礎を与えるとともに，自らもこれら応用技術によって支えられ，また進歩が促されるという相互に補完関係にあるわけである．以上に述べたような観点に立って，本章ではこの重要な溶接技術の発展過程を紹介するとともに，基礎となる溶接工学ならびに溶接法について要点を概述する．

1. 溶接技術の発達

1.1 溶接の特徴

溶接によって組み立てられる材料の種類は，接着材をも活用する広義の立場をとると，ほとんどすべてにわたりその制限はない．しかし，通常工業的に溶接組立になる製品は金属材料を用いたものであって，その主なものを示すと，船舶，航空機，自動車，鉄道車両，建築物，橋梁，プラント，圧力容器，パイプライン，原子炉，電気および電子機器，生産機械などである．

溶接構造では形状の選択が自由であり，水密・気密性も同時に確保できる．たとえば，各地でみかける図I.1の球形タンクも溶接によって初めて許容されるものであり，またその機能が維持できる．図I.2は板材の溶接継手を旧来法のリベ

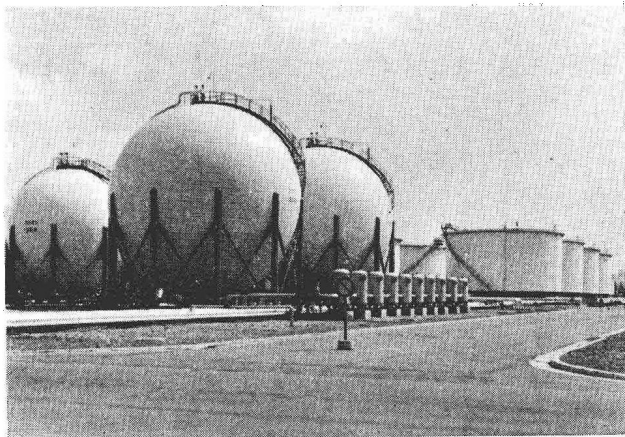


図 I.1 球形ガスタンクおよび円筒形石油タンク

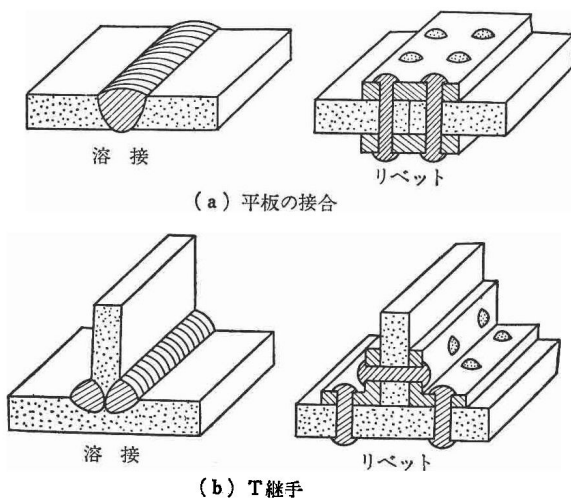


図 I.2 溶接継手とリベット継手

ット接合と比較した例であり、溶接では重量が軽減できる上に、継手効率も向上し、たとえば(a)ではほぼ100%が得られる。

近代産業において、いま一つの重要な課題は生産性の問題である。この点、溶接は他の工作法に比べて接合・組立速度が圧倒的に大きいばかりでなく、前工程などの付随的な作業も簡略化されているので、高能率で省力・省資源加工技術の

先端を進むものといえよう。またリベット接合のような騒音公害はなく、今後生活および作業環境を悪くする各種の公害問題に対しても大きな障害となるものはない。

溶接には上記のような卓越した数々の長所があるが、溶接特有の問題として留意しなければならない点もいくつかある。すなわち、溶接ではその接合のためのエネルギーは最終的には熱の形で消費される場合が多い。この熱履歴に伴って、溶接部近傍の材質が変化し、また熱膨張・収縮に伴う応力の残留ないしは変形のおそれも生ずる。また適用を誤ると、溶接部に割れその他の欠陥を招くこともある。さらに、溶接は一体化された剛接合を特徴とするので、いったん破壊が生ずると広範囲に伝播することになる。特に低温ぜい性破壊に関連して、割れ現象は重要な問題となる。したがって、溶接構造物では応力の集中をきたさないよう、細心の配慮が必要であり、溶接工学の重要な課題になっている。

1.2 溶接の重要性

溶接には生産技術上、前述のような大きな利点があるので、近代的な電気溶接法の出現以来急速に実用化されるに至った。工業的導入はリベット構造あるいは鋳・鍛造品などの溶接構造への置換えに始まり、これに伴って短所の克服と経験の累積、基盤となる溶接工学の体系化が着実に進められ、今日では溶接による積極的な合理化の推進、溶接の特徴を生かした高度加工品の製作へと発展している。

いまこれを船舶についてみると、戦前継手の10%程度の採用にとどまっていた溶接が、溶接用鋼材の開発と自動溶接化により、現在では90%程度へとほぼ全溶接船に変貌し、溶接に伴う重量軽減のため、約10%の載荷重量の増加をみている。また数十万トン級の船舶は今日では驚くほどのものではないが、リベット構造の戦前では想像を絶する巨大船であって、そこに溶接構造物としての特長を際立たせたものとして取り上げることができる。最近話題となっている本四長大架橋も溶接なくしては実現できない巨大構造物の例である。

精密加工の要求される代表的なものに、超深海船、原子炉、宇宙飛行体などが

ある。これらはいずれも苛酷な条件下で精密な制御に応答できることが必要で、構造上、特殊な材料あるいは超厚板の精密接合が要求される。これに対処できる接合組立技術は溶接以外には考えられない。また大量生産の代表ともいえる自動車産業では、溶接能率の大小がそのまま生産性を支配するまでに至っている。

上の諸例からも理解できるように、便利さ、確かさの観点から導入の始まった溶接は、技術革新が進みいわゆる知識集約産業化するにつれて「不可欠」さの比重を高め、特にわが国の指向する省人、省力化をはじめ、省資源、省エネルギー、環境保全の産業構造では、これらの目的に適合する溶接の特徴がますます認識され、今後の展開が重要視されることは必然といえよう。

1.3 溶接法の開発

溶接技術は有史以前から利用されており、わが国でも刀剣の鍛造（鍛接）にみられるように千有余年前から知られてきた。奈良時代には大仏の鑄造に鑄掛け技術が採用され、また金銀をちりばめた美術工芸品の製作には現在の冷間圧接法のはしりが認められる。しかし、近代溶接法が出現したのは1831年ファラデーが発電機を発明して、電気エネルギーが簡便に利用できるようになってからである。すなわち、現在広く実用されている溶接法のほとんどは19世紀末期以降に開発されており、表I.1はその主要な方法と開発時期をまとめたものである。

今日までに開発された溶接法は基本的なものだけでもほぼ50種にも及び、これらの応用ならびに組合せ形式のものを加えれば枚挙にいとまがない。さて表I.1を通覧すると、(A) 19世紀末～20世紀初頭、(B) 20世紀前半、(C) 今次大戦後の3ブロックに大別される。初期(A)は電気エネルギーの簡単な熱変換（アーク熱、抵抗熱）、化学反応熱の利用（火焰、テルミット）など、いわば素朴な溶接法の開発期にあたる。しかし、金属アーク溶接法は改良が重ねられ、今日では被覆アーク溶接法としてその簡便さから広く利用され、また抵抗溶接法も自動車その他の薄板工業で組立法の主力となっている。

中期(B)は構造用鋼の高能率溶接法（サブマージアーク溶接法）と高合金鋼およびアルミ合金など比較的溶接困難とされてきた材料の自動溶接法（不活性ガ