

## 溶接施工技術についての提言

安西 敏雄

株式会社 高田工業所 顧問

IoT (Internet of Things) や人工知能、ディープラーニングといった言葉を目にする機会が増えている。近年、製造分野では製造機器のIoT化が求められており、既にアーク溶接機の多くはデジタル化され、高度な溶接現象の制御やユーザインターフェースの利便性向上がなされてきた。しかし、今後は溶接作業性の向上だけでなく、膨大な溶接データを蓄積でき、広大なネットワーク記憶媒体(クラウド)への接続機能を有することが溶接機に求められる。このような時代において、溶接管理技術者の役割はより一層重要になる。ここでは、筆者の経験に基づいて、これからの溶接管理技術者に伝えておきたい事項について概説する。

### 1. はじめに

高田技報Vol.21で「わが社の溶接のあゆみ」について解説したり、溶接技術は、プラント設備や自動車・船舶・鉄道車両などの輸送機器など多種多様な製造分野で用いられている基盤技術である。溶接施工技術には、溶接前後の材料調達から成形加工、熱処理などを含むため、蓄積してきたデータベースやノウハウを駆使して製造工程の品質の確保・向上と生産性の向上に努めてきた。一方で、最近ではスマートフォンなどに代表されるように質の高いIT技術が普及しつつあり、生産効率を高めたため、情報のデジタル化とマニピュレーションを基盤とした生産プロセスの開発も推進されている。

ここでは、著者が長年にわたり溶接施工技術の管理に携わってきた経験から、次世代の溶接管理技術者に伝えたい事項について概説する。

### 2. 溶接部の特徴を理解する

溶接部の特徴を以下に示す。

- (1) 溶接継手は一体化されるため、万一き裂が発生すると構造物全体にき裂が伝播し、致命的な事故を起こす。
- (2) 溶接部は溶接熱によって熱影響部の金属組織が

変化すると同時に、溶接変形と溶接残留応力が発生する。溶接変形と溶接残留応力は相反するため、同時に両者を軽減することはできない。最近では、材料性能が向上し、溶接変形の方が重視される場合が多い。

- (3) 溶接部には溶接欠陥が生じることがある。溶接欠陥の中でもアンダカットや溶込不良のように、表面に露出した欠陥が応力集中部となり破壊損傷の起点となるため、避けなければならない。
- (4) 健全な溶接部であっても、種々の不連続部(discontinuity)が生じる。溶接部の不連続部には応力の流れが不連続となり、応力集中が生じる。溶接止端部、溶接残留応力分布、硬さ分布または溶接熱影響部の組織変化など多くの不連続部が発生し、これらは避けることができないものであり、破壊損傷の起点となり得ることを理解する。
- (5) 溶接欠陥の検出は容易でなく、非破壊試験を用いても検出限界以下の小さなきずは検出できない。例えば溶接現場では、「放射線透過試験を行い、無欠陥であったので、大丈夫だ」といった発言を耳にする。これは、あくまで放射線透過試験で検出可能なきずがなかったと認識すべきである。

ISO 9000規格が最初に制定されたときには、特殊工程を規定した箇条が設けられていた。特殊工程とは、事後の製品検査・試験では、その結果が十分に確認で

きず、製造の欠陥が製品の使用段階においてしか現れないような工程と定義され、監視や文書化された手順の遵守、作業者の技能・知識の認定記録の確認などが規定されていた。その後の改訂で、特殊工程を規定した箇条は削除されたが、特殊工程の考え方は引き継がれている。そして溶接こそが、特殊工程の典型的な例であると当初より認識されている。

### 3. 外観検査が重要である

溶接構造物の破壊事故は、80%以上が疲労破壊によると言われている。疲労き裂や応力腐食割れなど検出しにくい割れの発生が予想される溶接部に対しては、厳しい条件での非破壊試験が要求される。この場合、同種・同寸法の欠陥であれば、表面欠陥の方が、内部欠陥よりも溶接継手性能の低下に及ぼす影響は大きい。外観検査は、いつでも、どこでも、だれでも実施可能な試験であり、その結果がすぐに判明する利点がある。反面、検査員によって試験結果にばらつきが出ることが問題である。

溶接構造物の破壊事故のほとんどは、母材または溶接部の内・外表面を起点に発生しており、内部が起点となった事故例は非常に少ない。このことは内部欠陥を検出する非破壊試験も重要ではあるが、それ以上に外観検査が重要であることを物語っている。溶接部の非破壊試験に内部のきずを検出する放射線透過試験や超音波探傷試験を適用する場合でも、非破壊試験を実施する前に、外観検査で溶接部の表面を目視で確認することが不可欠である。特に、応力集中部となるアンダカットや溶込不良は入念にその有無を確認することが破壊事故を防ぐために必要である。また、外観検査の重要性を再認識して、試験結果にばらつきが出ないよう外観検査員の教育・訓練を計画的に実施する必要がある。

### 4. 余盛は高くしても溶接継手強度は上がらない

溶接現場で、検査官から「余盛が低いので、強度面から、もう少し余盛を高くして欲しい」と指摘され、どうすればよいかと相談される機会がたびたびある。元来、溶接部に溶接継手強度を低下させる溶接欠陥が発生することが多かった時代に、余盛は溶接欠陥による断面欠損によって溶接継手強度が低下することを考慮して、その強度低下を補うために溶接部表面を盛

り上げたものである。

軟鋼や低合金鋼の溶接継手では、一般に母材強度より50~100MPa強度の高い溶接金属の組合せ、すなわちオーバーマッチ継手が選択される。このオーバーマッチ継手に引張負荷を行うと、余盛がなく母材厚と同厚であっても母材において塑性降伏が先行し母材破断となる。

図1は、溶接継手の静的引張特性に及ぼす溶接欠陥率の影響を示しているが、溶接欠陥率が数%程であれば、引張強さはほとんど低下することはないことを示している<sup>2)</sup>。さらに昨今では、材料・溶接機器の性能は格段にあがり、また溶接作業者のスキルも向上しているため、溶接継手強度を低下させるような溶接欠陥が発生することは考えにくい。むしろ、余盛を高くすると疲労強度が低下し、溶接変形の増大によりぜい性破壊強度が低下するなど、デメリットしか見当たらない。

図2は、母材および突合せ溶接継手の疲労強度と母材の降伏応力の関係を示したものである<sup>3)</sup>。母材の疲労強度は、静的強度に比例するが、応力集中部を有する溶接継手の場合、疲労強度は低下するとともに母材の強度に依存しなくなる。余盛を削除して平滑にすると、溶接したままの継手よりも疲労強度が改善される。

図3は、鋼の溶接継手（余盛を削除してある）を引張変形させたときの引張方向の影響を示したものである。(a)は溶接ビードに直角方向に、(b)は平行方向に引張った場合である。一般に、鋼の溶接金属は母材よりも引張強さは大きく、伸びは小さい。(a)の場合には、荷重に直角方向の断面積に生じる応力は等しくなるため、それぞれの応力-ひずみ曲線からわかるように、母材と溶接部におけるひずみは異なり、母材の方が大きくなる。この場合の破壊は、引張強さの小さい母材で生じる。一方、(b)の場合には、母材と溶接部におけるひずみが等しくなり、応力がそれぞれ異なる。した

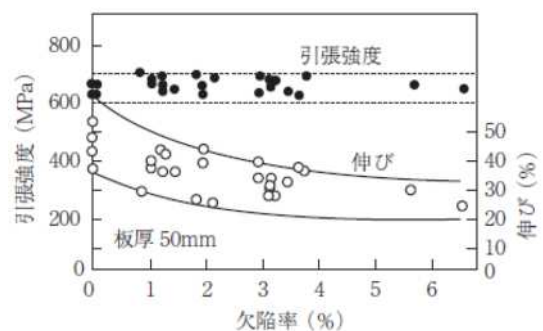


図1 溶接継手の静的引張特性に及ぼす欠陥率の影響<sup>2)</sup>

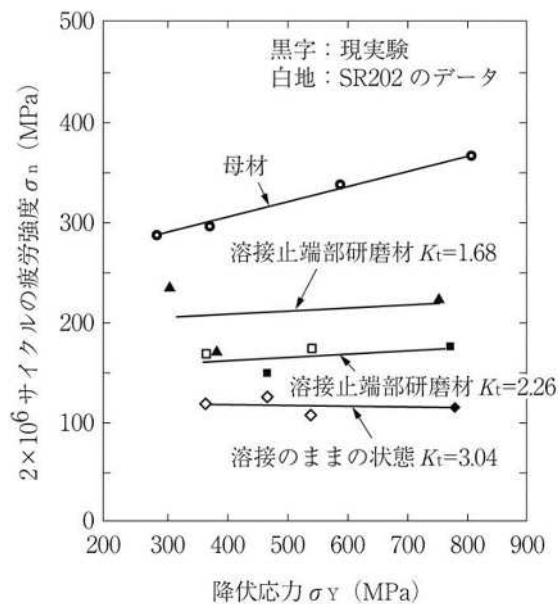


図2 母材および突合せ溶接継手の疲労強度と母材の降伏応力の関係<sup>3)</sup>

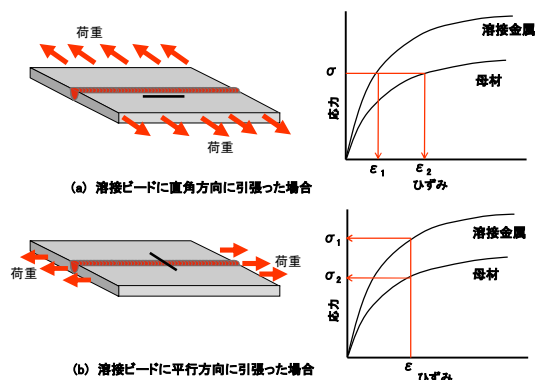


図3 鋼の溶接継手を引張変形させたときの引張方向の影響

がって、変形能の小さい溶接部でき裂が発生し、これが母材側に伝播して最終破断が起こる。このように、応力-ひずみ曲線の異なるものが共存している場合には荷重の掛かり方によって破壊形態が異なる。

### 5. 入熱制限は溶接部の冷却速度を制御する

高張力鋼、低合金鋼などは、低温割れ防止のために溶接入熱の下限を、オーステナイト系ステンレス鋼では、鋭敏化防止および高温割れ防止のために溶接入熱の上限を制限している。この溶接入熱の制限は、溶接部の冷却速度を制御することを意味している。溶接部の冷却速度で重要なのは、低温割れ防止のためには800~500℃の冷却時間であり、オーステナイト系ステンレス鋼の場合は850~650℃の冷却時間である。

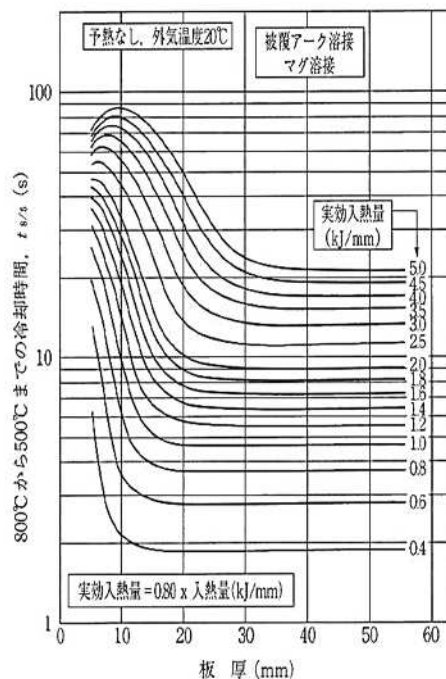


図4 炭素鋼を用いたビードオンプレートの予熱なしの場合の $\Delta t_{8/5}$ <sup>4)</sup>

図4は、炭素鋼を用いたビードオンプレートの予熱なしの場合の $\Delta t_{8/5}$  (800℃から500℃までの冷却時間)を示している<sup>4)</sup>。この図では、 $\Delta t_{8/5}$ は板厚が臨界値以上では板厚に依存しないが、臨界値未満の板厚では顕著に板厚に依存することが示されている。これらの冷却時間は、板厚に大きく依存し一定でない。そのため、溶接入熱制限を行う場合には、板厚別にその制限値を変えることが重要である。

## 6. シールドガスを上手に選択する

### 6.1 トーチシールドガスはArだけでない

炭素鋼やオーステナイト系ステンレス鋼をティグ溶接で行う場合、トーチ側シールドガスには通常、不活性ガスであるArが用いられる。半導体製造設備に関連する高圧配管の小口径配管では、ノンフィラー自動ティグ溶接が採用されている。この小口径配管の突合せ溶接は、I開先で溶接されるが、肉厚が3mmを超える場合には、トーチ側シールドガスにArを用いると十分な溶込みが得られず、溶込不良を生じる場合がある。そのため、この自動ティグ溶接ではすべての肉厚に対して、Arに2% $H_2$ を混合させた混合ガスが使用されている。Arに $H_2$ を混合するとアークが緊縮して、100%Arの場合より深溶込みの溶接が可能となる。このように、Arに2~5%の $H_2$ を混合すると、深溶込み溶

接が可能となり、溶接速度を大きくすることができる。その結果、溶接入熱が低減され、溶接変形の抑制も可能となる。

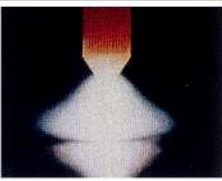
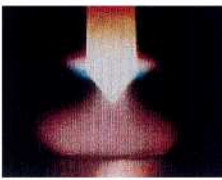
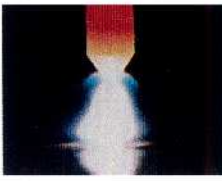
銅および銅合金のティグ溶接では、ArにHeを混合させたAr+50%Heガスを使用している。図5は、シールドガスの種類とアーク電圧の関係を示している。アーク長が同じであっても、シールドガスの種類によってアーク電圧は変化する。アークを維持するために必要なエネルギーは、ガスの種類によって異なるためである。熱損失の大きいHeをシールドガスに用いると、アーク電圧はArを用いた場合の2倍近い値となり、母材への溶接入熱が増加して深溶込みが得られる。そのため、銅および銅合金のティグ溶接でAr+50%Heをシールドガスに用いると、100%Arの場合に比べてアーク電圧が高くなり、予熱温度を低減できるため溶接性が大きく改善する。これが、熱伝導が大きな銅および銅合金のティグ溶接にAr+Heガスを用いる理由である。

また、HeはArに比べて高価なガスであるため、銅および銅合金溶接の専門メーカーでは、ティグ溶接にN<sub>2</sub>がトーチシールドに用いられている。N<sub>2</sub>では、二原子分子のN<sub>2</sub>が原子状のNに電離する際に放出される電離エネルギーが加わることにより、アークの電位傾度がArに比べて2.3倍程度大きくなる。そのため、同じアーク長でもシールドガスにN<sub>2</sub>を用いる方がArに比べ、アーク電圧が2.3倍となり溶接入熱も同じ比率で増加するため溶込みが深くなる。

銅および銅合金に限らず、熱伝導率の大きな材料の溶接には、アークの電位傾度の大きなガスを利用すると溶接性の改善が期待できる。

## 6.2 N<sub>2</sub>をバックシールドに使う

SUS304などのオーステナイト系ステンレス鋼製配管の突合せ溶接では、初層溶接ビードの酸化を防止するためにArを用いてバックパージしている。Arは高価なガスであり、コスト低減の目的からArの代替にN<sub>2</sub>を用いることは賢明である。しかし、今でも安全神話のようにバックパージにはArが用いられている。Arの代替としてN<sub>2</sub>を使用した場合の継手性能については、高田技報Vol.12で報告した通りであり<sup>5)</sup>、N<sub>2</sub>をバックシールドガスに用いても溶接継手性能はArを用いた場合と比べて、何ら劣るところはない。図6は、バックシールドガスにArとN<sub>2</sub>を使用したときの初層ビード表面の孔食電位を示している<sup>5)</sup>。この孔食電位はArを用いた場合よりN<sub>2</sub>の方が高く、耐食性が向上すると考えられる。今後、オーステナイト系ステンレス

| シールドガス                 | アーク形態   | アーク電圧 |
|------------------------|---|-------|
| Ar<br>(アルゴン)           |  | 12 V  |
| He<br>(ヘリウム)           |  | 25 V  |
| N <sub>2</sub><br>(窒素) |  | 28 V  |

溶接電流：100A ， アーク長：5mm

図5 シールドガスの種類とアーク電圧の関係

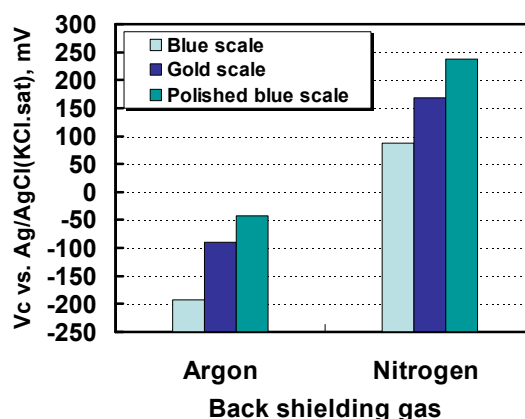


図6 バックシールドガスにArとN<sub>2</sub>を使用したときの初層ビード表面の孔食電位<sup>5)</sup>

鋼の溶接で、バックパージを行う場合には、是非N<sub>2</sub>ガスを使用することを推奨する。

## 7. グラインダ研削のリスクを知る

製造現場では、溶接作業で表面形状を整えるためにグラインダで材料表面を研削する。ここでは、ステンレス鋼のグラインダ研削について言及する。

ステンレス鋼は、耐食性を確保・維持するため材料の表層部に不動態皮膜を形成させ、耐食性を発現している。この不動態皮膜は、厚さ1~3nm程度でクロムの水酸化物あるいはオキシ水酸化物が主体の皮膜であ

る。ステンレス鋼表面をグラインダで研削することは、まさしくこの不動態皮膜を剥ぐ行為（耐食性の放棄）である。グラインダで研削されたステンレス鋼表面では、グラインダ作業による発熱効果と塑性変形によって、研削部には大きな引張残留応力が残存する。図7は、グラインダ加工による残留応力の形成を示しているが、x方向に大きな残留応力が形成されていることがわかる<sup>6)</sup>。また、塑性変形により孔食電位も低下し耐食性が低下する。

過去に、SUS304においてグラインダで研削した箇所、孔食を起点とする応力腐食割れが発生した事例があった。その応力腐食割れは、グラインダ研削きずに直角方向に進展していた。ステンレス鋼に対して、グラインダで研削加工すると、その箇所の耐食性は低下することを理解していなければならない。

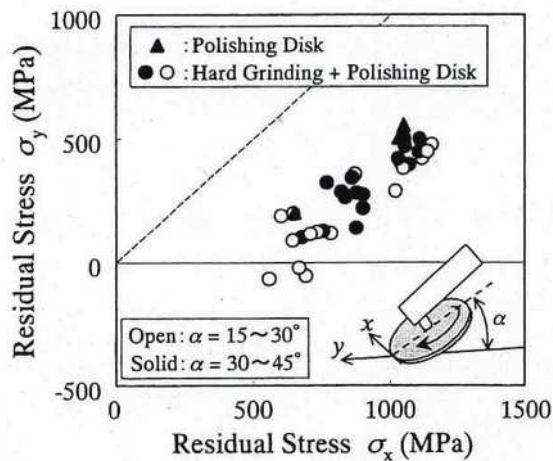


図7 グラインダ加工による残留応力の形成 (SUS316L) <sup>6)</sup>

## 8. おわりに

著者が溶接管理業務を通じて経験し、是非これからの溶接管理技術者に伝えておきたいことをいくつかピックアップして概説した。

溶接技術は、ICTの急速な進展、画像技術の高度化やコンピュータによる解析技術の進歩などにより大きく変革している。これからの時代において、大学での溶接研究者並びに、企業における溶接専門技術者の減少の一途をたどっている。反面、溶接構造物に対する社会からの安心・安全の要求はさらに強くなり、溶接管理技術者の育成は企業にとって、これからの大きな課題である。

## 参考文献

- 1) 安西: 高田技報, Vol.21 (2011), pp.6-9
- 2) 石井, 他: 非破壊検査, Vol.16, No.8, pp.319
- 3) 渡部, 他: 溶接学会論文集, Vol.13 (1995), pp.441
- 4) 百合岡, 大北: 鉄鋼材料の溶接, 産報出版, (1998), pp.224
- 5) 安西: 高田技報, Vol.12 (2002), pp.16-21
- 6) 鈴木, 他: 圧力技術, Vol.24, No.4 (2004), pp.188-198