

「溶接技術」平成11年4月号別刷

# 溶接の現象と仕組み

中田 一博

1999年4月

大阪大学接合科学研究所

# 溶接の現象と仕組み

中田 一博\*

## 1 溶接—とがしてくっつける—

溶接法には種々の方法があるが、狭い意味では文字どおり溶かして接合する方法ということであり、一般的には熔融溶接法を指す。

今、2枚の金属板を図1のように突合せて、その突合せ部を溶接する場合を考えてみよう。この場合、突合せ部を局所的に加熱して熔融する必要がある。

もし図1(a)に示すガスコンロのような分散した熱源で加熱した場合は板全体の温度は上昇するが、突合せ部のみを溶かすことはできない。

このため図1(b)のように突合せ部を集中して加熱する必要があるが、熱源の温度があまり高くない場合には熱伝導により突合せ部より熱が周辺の板に逃げてしまい、やはりうまく溶かすことが難しい。したがって、熱が逃げないうちに突合せ部のみの温度を急速に上昇させるためには集中した熱源で、かつ高温の熱源が必要となる。

すなわち溶接熱源にはエネルギー密度の高い集中熱源が用いられるのである。表1に各種熱源のエネルギー密度を比較して示す。代表的なもっとも良く利用されている

表1 各種熱源のエネルギー密度

熱源の種類	エネルギー密度(KW/cm <sup>2</sup> )
酸素-アセチレン炎	~ 1
太陽光線	(1.6~3.6) × 10 <sup>-4</sup>
電気アーク	~ 5
レーザービーム	100以上
電子ビーム	1000以上

る溶接熱源は電気アーク放電であり、これを用いる方法はアーク溶接法と呼ばれている。

## 2 アーク放電

溶接に用いられるアーク放電には電極材料とシールドガスの種類により種々のタイプがあるが、ここでは図2(a)に示すティグアーク(TIGアーク：タングステン・イナートガス・アーク)を例にとり説明する。タングステン電極を陰極とし、溶接したい金属板(これを母材という)を陽極とする。この間に電圧を印加するとアーク放電が発生する。もちろんいきなりでは発生しないのであり、次のいずれかの方法がとられる。

- (1) まず電極と母材を接触させて通電した状態で両者を引き離すと、その瞬間に火花放電が発生し、これ

\*ナカタ カズヒロ/大阪大学接合科学研究所

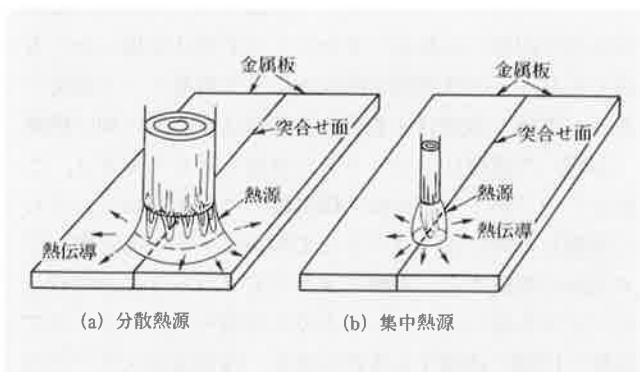


図1 溶接熱源の形態

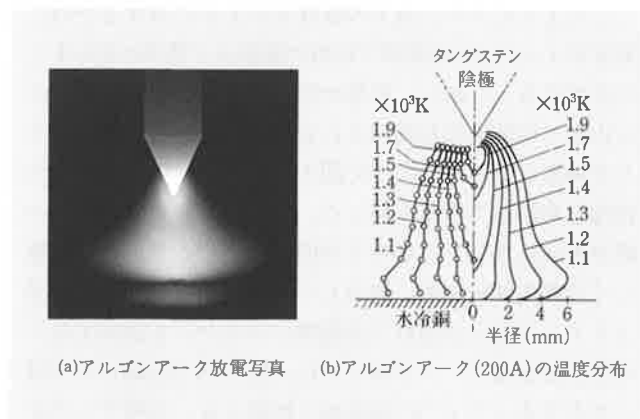


図2 ティグアークの例

が引き金となってアーク放電が始まる。

(2) もう1つの方法は、高周波を電極と母材の間に印加する方法であり、これが引き金となってアーク放電が始まる。

身近な工事現場でよくみかける被覆アーク溶接（いわゆる手溶接）では(1)が用いられるが、ティグアーク溶接では(2)が用いられる。

母材と電極の間では酸化防止のために通常はシールドガスとして不活性ガス（アルゴン、ヘリウム）が流されているが、アーク放電が始まるとこれらの気体ガスは加熱されて電子とイオンに電離した熱プラズマと呼ばれる状態になる。この熱プラズマの温度はきわめて高く、図2(b)に示すように数千度～2万度に達する。これがタングステン電極と母材電極部との間のわずか数mmの空間に存在することになる。

アーク放電が始まると、タングステン電極や母材電極部にはアーク中心部の高温熱プラズマから伝導される熱と、さらにプラズマからのイオンおよび電子の流入による電極特有の発熱作用（これを電極発熱と呼ぶ）とにより加熱される。とくに電極発熱による加熱効果が大きく、電極材料の溶融温度（融点）が低いと直ちに溶けることになる。ティグ溶接では陰極電極には融点のきわめて高いタングステン（融点：3,410℃）を使用し、さらに電子が放出しやすい機能を有している酸化物（ $La_2O_3$ 、 $CeO_3$ など）をタングステンに少量添加して電極の消耗をおさえる工夫をしている。一方、タングステン電極の対極（この場合は陽極）となる金属板はその融点は例えば鉄では1,539℃、アルミニウムではわずかに660℃と低い。このためアーク放電が発生すると、十分な放電電力（電流×電圧）があれば金属板の電極部を局所的にかつ短時間に溶かすことができる。

### 3 溶接ビードの形成

このようにアーク直下の板はすみやかに溶けるために板厚が1～2mmの薄板では板の裏側まで簡単に溶かすことができる。しかし、板厚が厚くなってくると板表面から内部への熱伝導が制約されるために裏側まで溶かすことが困難となる。このため図3に示すように突合せ部の板端を切断して板厚を減じる。これを開先と呼び、その断面形状によりV、UやY形開先などがある。溶接に際しては開先部を完全に埋めもどす必要があるために外部よりアーク部に溶加材（金属棒、ワイヤ）を添加する。溶加材は溶接アークで溶かされ、開先内で溶融した母材とまざりあって1つの溶融池を形成する。溶接アークを開先にそって一定の速度で移動すると、開先内は連続的

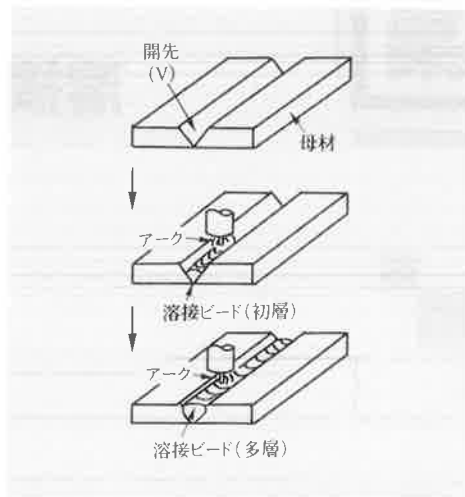


図3 溶接ビードの形成

に溶融され、同時に溶融池の後方では溶融金属が固まり、開先内が埋められてゆく。開先は母材表面より若干盛り上がるように埋められるが、これを溶接ビードと呼ぶ。板厚によっては何度にも分けて溶接ビードを積み重ねて開先を埋める必要がある（多層溶接）。

溶加材の供給方法にはワイヤ状の溶加材を電極として用いる方法があり、電極ワイヤと呼ばれる。ティグ溶接におけるタングステン電極とは異なり、電極ワイヤはアーク熱により簡単に溶けて溶融池へ落下する。アークを維持するために電極ワイヤはアーク部へ毎分数mの高速で送給される。このようなアーク溶接法には、代表的なものとしてミグ・マグ溶接があり、その例を図4にティグおよび被覆アーク溶接と比較して示す。

さてすでに述べたように溶融池およびその周辺は高温に加熱されているために大気に直接ふれると酸化、窒化され、また溶融池では酸素、窒素、水素（水分の分解生成）が吸収されて溶接ビード部の機械的、化学的性質を劣化させる。これを防ぐために溶接中は溶融池周辺は電極とともにシールドガスで保護される。これには不活性ガス（アルゴン、ヘリウム）や炭酸ガス、これらの混合ガスなどが用いられる。またシールドガスを用いない方法もあり、その代表例が図4(c)に示す被覆アーク溶接である。電極と溶加材を兼ねた溶接棒は中心部の細い棒鋼（心線）の周囲にフラックスを塗布したものであり、これがアーク熱で分解されて保護性のガスを発生し、さらに溶融した時にはスラグとして溶接ビード表面を覆って大気から保護する。電極ワイヤでもフラックスを含有したワイヤを用いて、シールドガスを用いずにミグ・マグ溶接と同様に溶接する方法もある。冷却後はスラグは溶接ビード表面から簡単に、かつ、きれいにはがれること

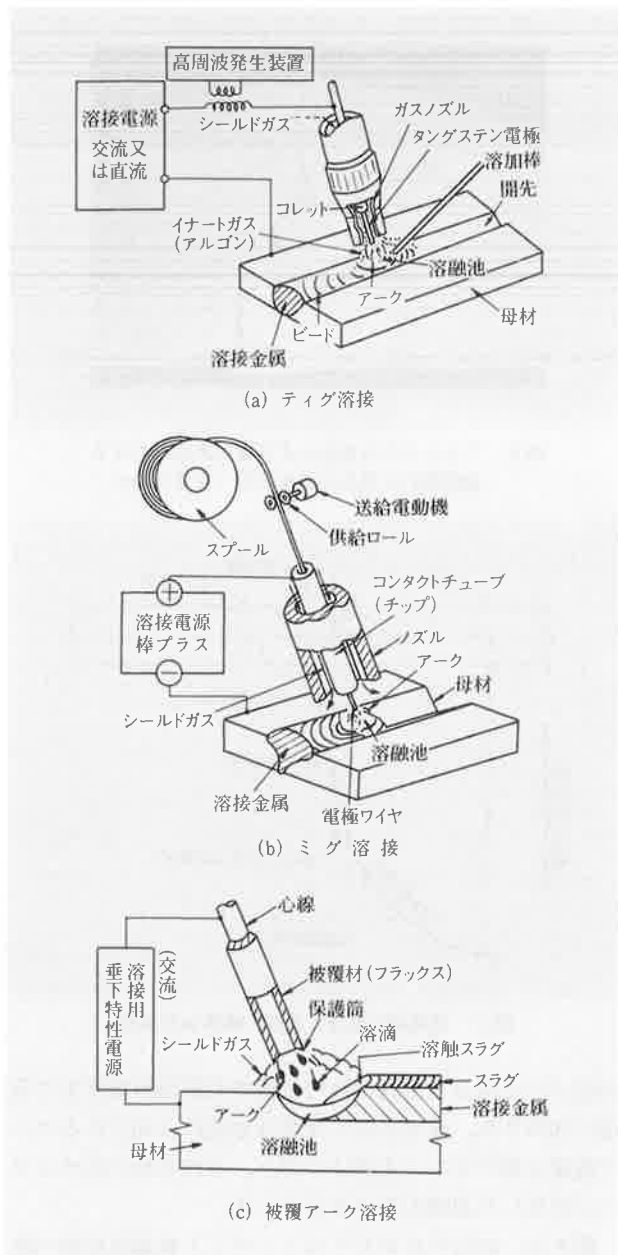


図4 各種アーク溶接法の模式図

はいうまでもない。

## 4 溶接凝固現象

このようにアーク直下の金属板は簡単に溶けるが、それではどのようにして溶接部が形成されるのであろうか。図5は溶融池とその周辺の組織のスケッチ図である。溶融池を縁どる境界線はちょうど融点に相当する等温度線である。溶融池の進行方向側では板は加熱域にあり、室温から一気に融点もしくはそれ以上に加熱され、連続的に突合せ（開先）部を溶かしてゆく。一方、後方側（進行方向と反対側）は冷却域であり、ここでは溶融池の後

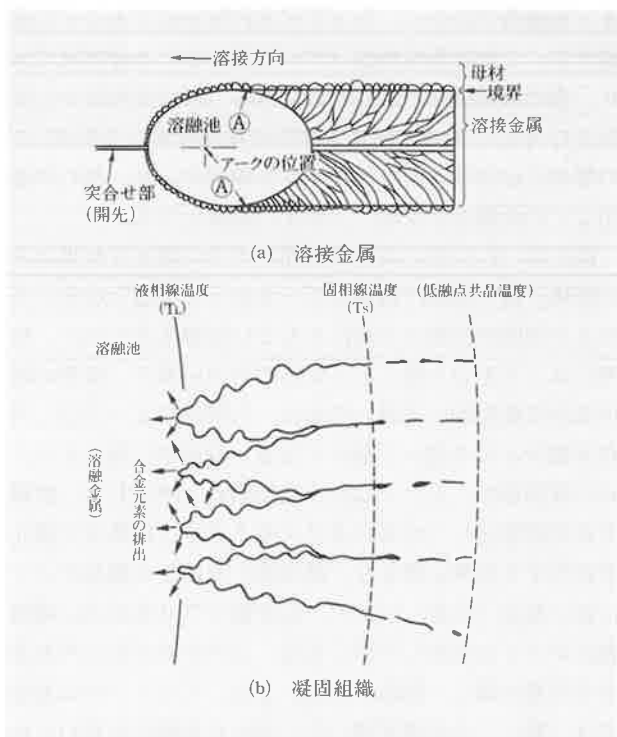


図5 溶融池周辺の形成組織

端で溶融金属が固まる。これを凝固と言う。このとき、溶融池に接している母材はちょうど鋳物における鋳型の役割をはたしている。しかし鋳造と根本的に異なる点は、鋳造では凝固した金属と鋳型は一体化していない（はがれる）のに対して、溶接部では溶融境界部において（図中のA位置）、その一部が溶融された母材結晶が種結晶となってそのまま1つの結晶（柱状晶）として成長することである。このため突合せされた2つの金属板（母材）は金属学的に1枚の板として完全に一体化される。またこの部分は溶接金属と呼ばれ、母材成分と溶加材成分が一定の割合でまざりあった組織となっている。

図5(b)は凝固しつつある部分の拡大図である。純金属では凝固開始温度 ( $T_L$ : 液相線温度) と凝固完了温度 ( $T_S$ : 固相線温度) は同一（いわゆる融点）であるが、合金では異なっており、この温度範囲では液体と固体が共存した状態となる。鉄鋼ではこの温度差は20~30℃と狭いが、アルミニウム合金では一般に広く、ジュラルミンでは100~150℃にもなる。

さて一般の合金系では溶融状態では多くの合金元素を溶かし込むことができるが、固体状態では固体内に取り込むことができる合金元素の量は大幅に低下する。このため凝固が始まると固体内で取り込めなかった余分量は溶融池に排出され、凝固界面の周囲の液相中で濃化する。この濃化層の存在のために凝固界面はミクロ的にみ

ると直線的ではなく、ちょうど木の枝が広がるように成長する。これは樹枝結晶（デンドライト）と呼ばれており、氷の成長模様と同じものである（形成原理は少し異なる）。そして最後に固まる部分が結晶粒界となるが、この部分には合金元素が濃化される傾向があり、割れや脆化などの問題を引き起こしやすい場所となる。

例えば、 $T_s$ に近い所では周囲がすでに固まり粒界のみに液体が薄く膜状に残留しているような状態となる。このとき周囲の固相は冷却にともない収縮するために、粒界にはこれを引き裂くような引張の力が働く。粒界の液体部分は強度的には弱いために、力関係によってはこの粒界部分が口を開いて割れとなる。凝固中に発生するために凝固割れ、もしくは広く高温割れと呼ばれる。鉄鋼では不純物として含まれるリンやイオウは液体中で濃化されやすく粒界に集まり、鉄元素と反応して融点がとくに低い組成（共晶）となり、 $T_s$ を低下させるために凝固割れがとくに発生しやすくなる。このためこれらの元素の含有量は極しく制限される。また、アルミニウム合金では一般にこの温度範囲が広く割れの危険性が高いため、前述の溶加材により適当な合金元素を新たに添加して溶融池の成分を調整するなどの対策がとられる。

また、溶融池のシールドが不十分な場合には、すでに述べたように大気中から酸素、窒素、水素が溶融金属中に吸収される。これらの元素も凝固時には凝固界面の液体中に排出され、濃化する。このとき、液相中の溶解限度を越えるとガス分子となり、それらが集合して液相中で気泡を作る。これが固相中に取り込まれると気孔（ブローホール）となる。鉄鋼ではCOガス、アルミニウムでは水素ガスが主な原因ガスである。

凝固割れと気孔は凝固時に溶接ビード部で発生する代表的な溶接欠陥であり、溶接施行においてはとくに注意する必要がある。図6にアルミニウム合金のミグ溶接部の断面組織を示すが、凝固割れと小さな気孔の発生例である。

## 5 形成組織

以上、溶接ビードが形成される過程を述べてきたが、ここでは溶接部の形成組織についてふれてみよう。

図7<sup>2)</sup>は溶接部断面のスケッチ図であり、各部の呼び名と溶接中に受けた最高加熱温度を示す。溶融点以上に加熱された部分は溶融池が凝固した部分に相当し、すでに述べたように溶接金属部と呼ばれる。母材部と溶接金属部の間には熱影響部と呼ばれる部分があり、この部分の最高加熱温度は、融点直下の高温に加熱されたボンド部から母材部に向かって急激に低下する。溶接中は溶融池

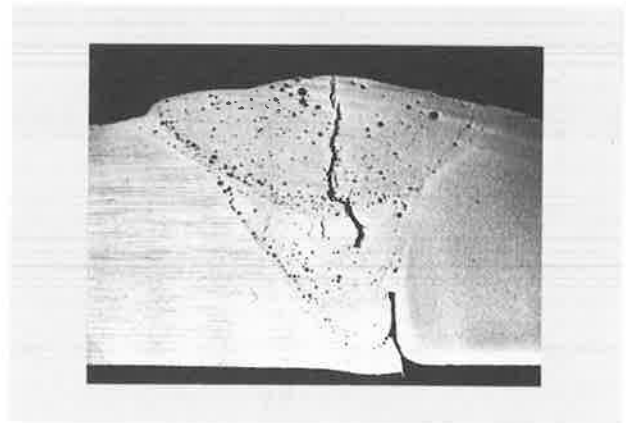


図6 アルミニウム合金ミグ溶接部断面における凝固割れと気孔の発生状況（板厚 9 mm）

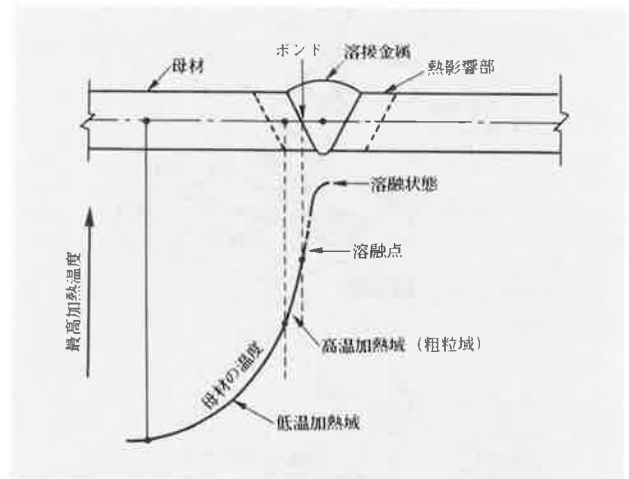


図7 溶接部の構成と各部の最高加熱温度

が近づいて来るとそれぞれの位置の最高加熱温度まで急速に加熱され、遠ざかると今度は急速に冷却されるという複雑な熱サイクルを受けており、それぞれの熱サイクルに対応した組織が形成されている。

図8(a), (b)はそれぞれアルミニウムと軟鋼溶接部の断面のマクロ組織（模式図）を示す。

アルミニウムでは温度が変わっても結晶構造には変化がなく、鉄のような変態現象が無いために、熱影響部の組織の識別は比較的簡単である。通常の母材は圧延などにより細長く伸ばされた加工組織を呈しているが、高温で一定時間以上加熱されると加工組織はこわれて、粒状の組織に変わる。これは再結晶（結晶構造そのものには変化はない）と呼ばれており、すべての金属材料でみられる現象である。再結晶温度（融点の約半分）以上に加熱された部分では温度が高いほど結晶粒は大きく成長し、粗大化する。一般的にはこの部分が熱影響部と呼ばれる。再結晶組織は加工組織よりも硬さが低下するために、熱影響部は溶接金属部とともに軟化しており、マク

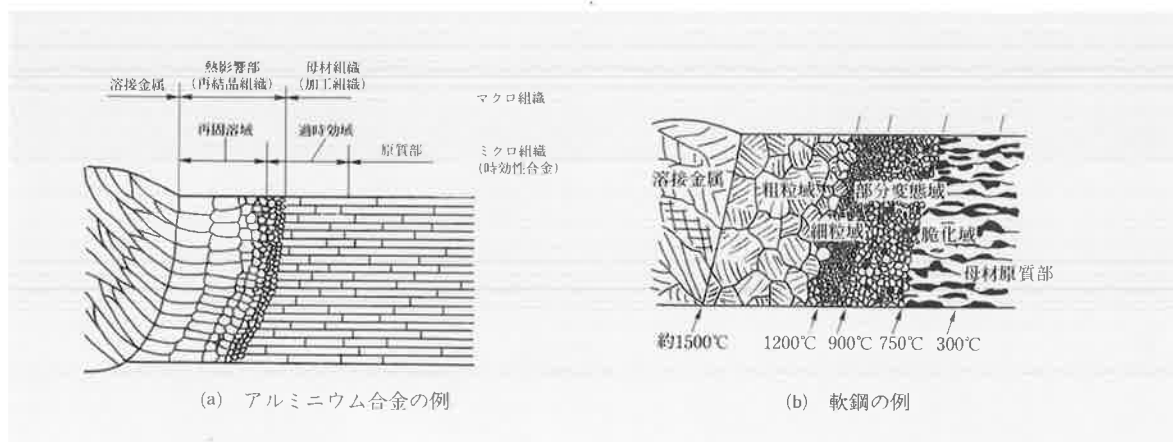


図8 溶接部熱影響部の形成組織

ロ組織変化とともに硬さ変化からも熱影響部は明瞭に識別できる。なお溶接金属部は凝固時に形成された粗大な柱状晶からなっており、受けた熱サイクルは異なるが、組織的には熱影響部と同様の再結晶組織である。なおジュラルミンのような析出強化型のアルミニウム合金では、このようなマクロ組織の変化以外に、強度強化のために母材中に析出させた析出物が加熱により分解や粗大化する現象が加わり、硬さの低下域は再結晶域よりもさらに低温側（約150℃程度）まで広がる。アルミニウムと同様な熱影響部組織は銅、ニッケル合金やまたオーステナイト鋼、フェライト鋼でも見られる。

これに対して図8(b)に示す軟鋼に代表される鉄鋼（高張力鋼、炭素鋼、低合金鋼など）の熱影響部組織は少々複雑である。これは、軟鋼では750～900℃の温度域を境にして、単にマクロ組織的な変化だけではなく、結晶構造そのものがまったく異なるものに変化する現象、すなわち変態と呼ばれる現象が発生するためである。昆虫における変態とは異なり、鉄の変態では加熱時に低温相（フェライト）から高温相（オーステナイト）へ、冷却時には高温相から低温相へと可逆的に変化できる。軟鋼溶接部は融点直下のボンド部より母材部にかけていくつかの特徴的な領域に分かれる。ボンド部は熔融温度域（図5(b)の $T_L$ - $T_S$ 間）にまで加熱されており、溶接金属と熱影響部との間の元素の強い移動拡散の生じる部分であり、金属組織学的に問題の生じやすいところである。変態点以上の高温に加熱された領域（溶接金属部を含めて）は、いわゆる再結晶域に相当しており、ボンド部に近い所では結晶粒が粗大化し、かつ冷却後は硬い相に変化するために脆くなり、割れが発生しやすい。この割れには溶接中に溶接金属中に吸収された水素のボンド部および熱影響部への拡散現象が関係しており、冷却中の比較的低温

度（室温から約200℃程度）で発生するために低温割れと呼ばれている。

750～900℃に加熱された領域は部分変態域であり、その直上の細粒域とともに比較的じん性は良好である。変態点以下の300℃以上に加熱された部分はマクロ組織的には母材との間には大きな変化は認められないが、加熱ともなう析出およびひずみに誘起される析出反応によって脆化することがあり、このような意味で溶接部に生じる材質の不均質性はこの温度範囲まで及ぶことに留意しなければならない。

溶接金属は適当な溶加材を選定することにより組織制御が可能であるが、一般に母材よりもやや高い強度になるような組成のものが用いられることが多く、延性はやや低くなる。一方、熱影響部の強度はその組織に強く依存し、したがって、最高加熱温度、その温度での保持時間、冷却速度などに影響されるため、入熱条件や形状、位置などによって異なる。このように、溶接においては、異なる材料を接合したときはもちろんであるが、たとえ同じ材質のものでも組織学的に見ると溶接部は不均質である。このような理由から、溶接する際には、その溶接・接合部の金属学的問題点の検討はきわめて重要である。

また、溶接部は局所的に急激な加熱とそれに引き続く急冷却を受けており、これまでに述べてきたような金属学的な問題点だけではなく、加熱時の膨張と冷却時の収縮に起因する残留応力、歪や変形の発生を溶接部にもたらしている。このため、溶接部は力学的にも不均質性を有していることを理解しておく必要がある。

#### 参 考 文 献

- 1) 溶接学会編：溶接・接合便覧，丸善，(1990)
- 2) 溶接学会編：溶接・接合工学の基礎，丸善，(1993)