

ものづくり基礎講座 金属の魅力をみなおそう
プロセス技術編 第3回 溶接・接合（第40回技術セミナー）

東北大学金属材料研究所 正橋直哉

1. はじめに

紙をのりで画用紙に貼り付ける、ドライバーでネジを締める、ボタンを糸で服に縫うという、様々な行為の共通点は、異なるものをつないで一つの物に仕上げることです。物と物とをつなぐことを「接合」と称しますが、金属における代表的な接合は、金属を溶かしてつなぎ合わせる「溶接」です。本項ではこの二つの用語を一括りにし「溶接・接合」として紹介します。

一体化した物が再びばらばらにならないようにするには、つなぎとめる力が必要です。瞬間接着剤が「のり」より強い接着力を持つ様に、つなぎとめる力は接合方法に依存します。素材としての金属は紙や繊維より強度が高く、接合には強い力が必要です。そのため、固体同士よりも強い結合力が得られる液相状態を経由した「溶接」が利用されます。液相状態ではより効率的に原子が混ざりますので、固相よりも高い接合力が得られます。本稿では「溶接」の定義を「異なる部材の接合部分を熔融して一体化すること」とします。金属を溶かすには融点以上に加熱しなくてはならず、材質や形状が変化して、割れや空隙が生じ易くなります。そのため固体状態で圧力をかける「圧接」や、素材は溶かさずに素材よりも低融点のろう材を使ってつなげる「ろう付け」等が用いられます。歴史的に用いられてきた金属の融点は、鉛（327℃）、金（1063℃）、銀（960℃）、銅（1033℃）、鉄（1535℃）、亜鉛（420℃）、スズ（232℃）です。この中で融点が高い鉛やスズは半田（鉛-スズ合金）として、金属の接合に使用されてきました。一方、高温で使用する調理具や、強さが必要な武器や農機具等は半田が使用できず、とりわけ鉄の接合には圧接が用いられてきました。圧接のうち素材を加熱して接合する技術を「鍛接」と称し、日本刀の製造に用いられる古くからの技術です。

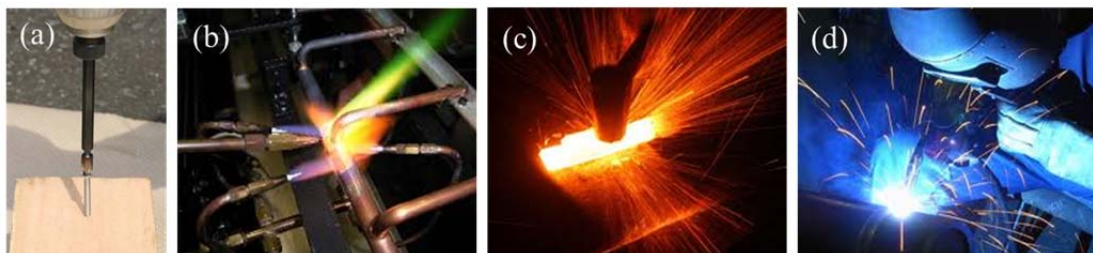


図1 様々な接合:(a)ネジ締め、(b)ろう付け、(c)鍛接、(d)溶接

2. 接合の分類

接合方法を図2のように「機械的接合」「化学的接合」「材料的接合」に大別して説明します。「機械的接合」とは、被加工材またはリベット等の結合補助材の変形を利用して接合する技術で、簡便な工具で容易に組立解体が可能で信頼性が高く、破断が生じても接合部で破壊の進展を防げることができます。一方、信頼性の高い接合を得るには多数の部品や加工が必要で、継手が重ね継手となることや接合部品により製品重量が重くなるという短所が上げられます。「化学的接合」は材料表面の凹凸に接着剤や樹脂を流し、物理的に外れ難く（アンカー効果）する接合を称します。長所は、ほとんどの材料や異材の接合が可能な点、素材の性質や形状を変化させない点、気密・水密性が高く、製品の外観品質に優れ、電気的・熱的絶縁が得られる点です。一方、短所は、固定化に時間がかかり継手の耐熱性に限界がある点、継手の信頼性や耐用年数に関するデータが少ない点です。「材料的接合」は、2つの金属を溶かして混ぜ合わせた接合（溶接）が主ですが、溶かすほどには加熱せずに固相状態で接合部に圧力を加える接合や、2つの金属の間に溶けた金属（液相）を流しこむ接合、そして接合したい素材を気相から蒸着する方法などもこの分類に入ります。長所は、継手形状が簡単で自由度が高く短時間で接合できる点と、継手効率、気密・水密性が高く、製品重量の低減、組立工数の減少が可能な点です。短所は、歪みや残留応力が発生し、寸法精度の維持が困難なために欠陥が発生しやすい点と、解体が難しく破断を止めることが難しいため、機械的性質や形状の不連続が発生する点です。

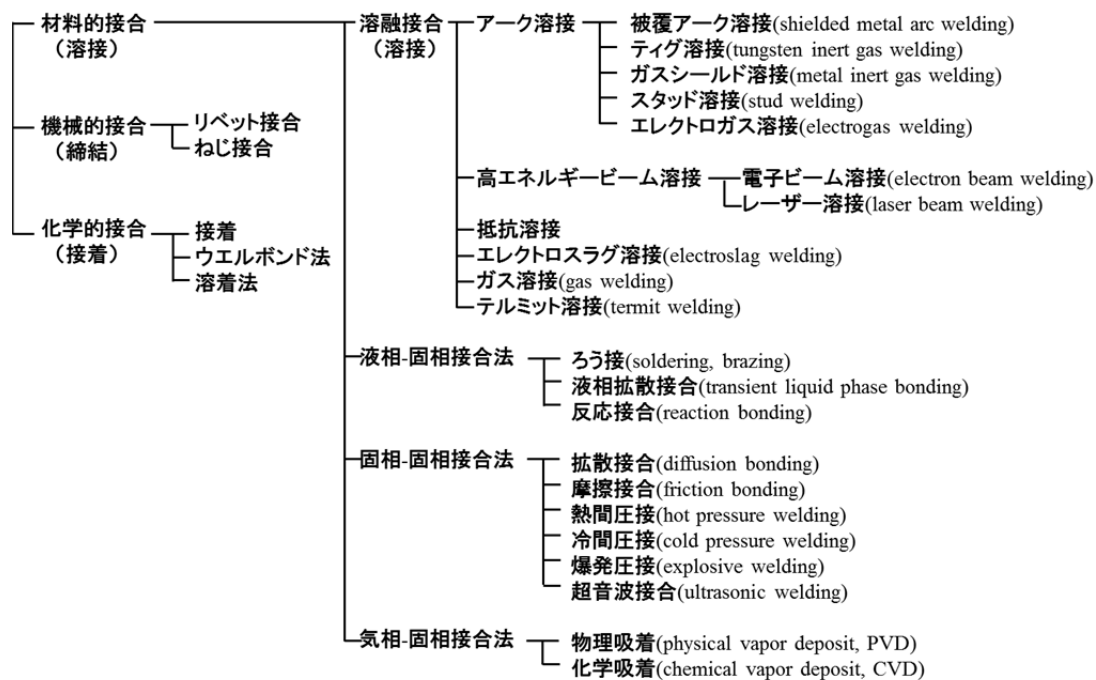


図2 接合・溶接の分類

本節では「材料的接合」について、つなげたい素材の状態、すなわち、固相・液相・気相のどの相に属するかによって説明します。素材が固相のまま接合する場合を「固相-固相接合」と称しますが、固体状態で部材を接合させるには、素材が溶融しない程度のエネルギーを素材に供給しなければなりません。そのエネルギー源として通常は熱と圧力を用いますが（加熱や加圧を施す）、そのほかのエネルギー源として、摩擦・爆発・超音波なども用いられます。一方、片方が液相で片方が固相の場合の「液相-固相接合」では、融点の低い第三の素材を加熱して溶かし（液相）、つなげたい素材間に接着剤の様に配置して、固相状態の第一と第二の素材を接合します。また、片方の素材が融点以上（液相）で、もう片方の素材が融点以下の温度（固相）で接合する場合もこの分類に入ります。そして、一方の素材が気相で他方が固相の「気相-固相接合」では、気相状態を作り出すための高エネルギーが必要です。具体的には、減圧下で蒸発源の物質を沸点以上に加熱して気化させ、固体表面に堆積させて成膜する物理吸着（PVD）と、素材となる反応物質を気化させてから反応ガスと混合して加熱し、固体表面に皮膜を形成する化学吸着（CVD）があります。そして、固相と固相の一部を溶融させるのが「溶融接合」で狭義の溶接はこの分類となります。図3はこれらの接合を模式的に描いたものです。「溶融

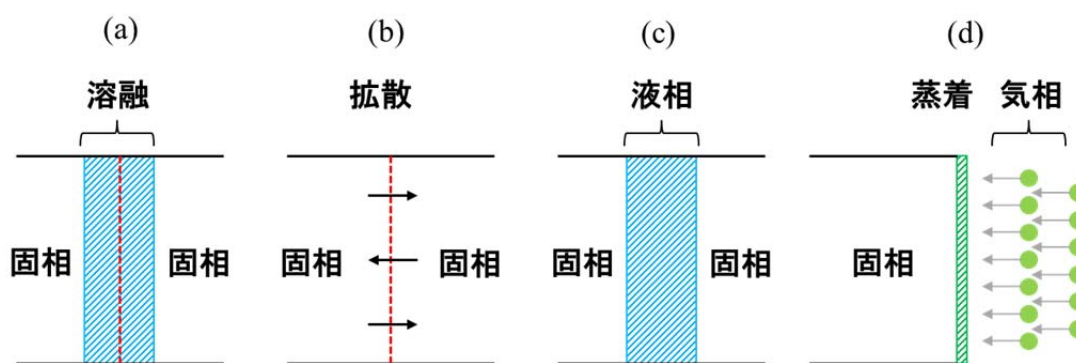


図3 接合の模式図:(a)溶融接合、(b)固相-固相接合、(c)液相-固相接合、(d)気相-固相接合

接合」は強固な接合を得る手法として多用され、溶接部と溶接棒を電極としてその間で放電し、その際の発熱によって溶接棒を溶かして接合する「アーク溶接」が一般です（アークは次節で紹介します）。アーク溶接は溶接棒の種類（被覆材で被覆するか否か）、溶融金属部の雰囲気（シールドガスの種類）、アークの発生方法（電極部位やアーク熱源のエネルギー）等により、その方法が細分されます。「アーク溶接」以外には、酸素とアセチレン、あるいは酸素と水素などを燃焼して溶解接合する「ガス溶接」や、大電流を流して発生したジュール熱による「抵抗溶接」、エネルギー密度の高いレーザーを使用する「レーザー溶接」や電子ビームを利用した「電子ビーム溶接」を総称した「高エネルギービーム溶接」等があります。

3. 溶接

溶接は金属を加熱して溶融し異なる物質を接合させる技術ですので、金属は一旦液体になった後に固体へと変化します。金属の融点は、最も低い水銀の -38.8°C から最も高いタングステンの 3370°C まで広範に分布します。私達の身の回りに多用される金属の融点は、アルミニウム (660°C)、銅 (1033°C)、ニッケル (1452°C)、鉄 (1535°C)、クロム (1615°C)、チタン (1820°C) というようにアルミニウムを除いて軒並み 1000°C を超えます。このような高温では、金属の反応性が高くなり、溶接後の材料にはその影響が残ります。最も懸念されるのが、高温状態で大気中の気体分子が溶融金属に混入し、冷却後にブローホール (写真1) と称する空隙を残すことでおこる脆化です。溶接では、金属は急速に加熱冷却しますので、溶融凝固時の金属組織粗大化により、靱性低下や高温割れ感受性増加も起こります。さらに、最初に凝固する領域と最後に凝固する領域の間で、合金元素や不純物の濃度差がおこり (マクロ偏析と称し、次節で詳述します)、特性の不均一が発生します。接合部は溶融凝固しますが、溶融しない母材の領域は溶融凝固部を拘束するため、溶接金属部は残留応力が発生します。どの現象も溶接後の材料特性に対し悪影響を及ぼしますので、現象に応じた対策が必要です。



写真1 溶接試験で発生したブローホール
(<http://www.rtri.or.jp/rd/news/structure/structur>)

ブローホールは溶融金属への気体分子の混入が原因ですから、溶接時にシールドガスと称する保護用の気体を流して気体の混入を防ぎます。シールドガスは通常、炭酸ガス・アルゴンを主成分とし、それに酸素・水素・ヘリウムなどを添加した混合ガスが使われます。例えば、鋼の場合は溶接アークを安定にするために、炭酸ガスや酸素を微量混ぜますが、酸化が起こりやすいチタンやアルミニウムの場合は、不活性ガス主体のシールドガスを使用します。シールドガスには、もう一つアークを安定化させる働きがあります。溶加材 (ワイヤまたは溶接棒) が母材とスパークした瞬間、発生した熱でシールドガスがイオン化し、アークが生じます (図4)。アークは電気を通すため、一度アークが生じるとアークを介して電気が

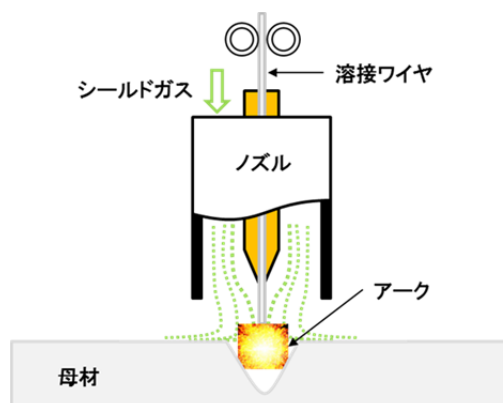


図4 MIG接合の模式図
(緑点線がシールドガスの流れ)

流れるようになり、アーク自体が発熱して周囲のシールドガスをイオン化します。アークはある段階まで成長すると一定の条件下で安定となり、溶加材や母材を溶融させます。シールドガスは溶融金属やアークを保護する役割があるだけでなく、実はアークそのものです。したがってシールドガスの成分はアークの状態を大きく左右し、ひいては溶接の健全性に影響を与えます。

溶接には金属を溶かすための熱源が必要ですが、アークの発見により飛躍的に普及しました。アークとは、電極間に電位を加えると、電極間の気体が電離して励起状態になって電流が流れ、閃光と高温を伴って起こる放電現象を称し、1800年に英国のデイビー (Humphry Davy) が発見しました。1887年にロシアのベルナルド (N.N. Bernardos) が母材とホルダで挟んだ炭素棒を電極とし、横から溶加材を添えてアーク点を移動させることで初めて溶接に成功し、特許を取得しました (図 5)。1907年にスラビアノフ (N.G. Slavyanov) が被覆剤 (フラックス) を塗布した溶接棒を使用することで、アークの発生とその安定持続を可能としました。ここで特筆すべきは被覆剤 (フラックス) の役割です。その役割の第一は、アーク開始を容易にし、アークを安定に維持すること、第二は大気から溶接金属を保護すること、そして第三は、酸化した金属を還元する脱酸作用を有すること、です。1930年には、溶融金属を大気から遮蔽するために、不活性ガス中でアークを発生させるティグ溶接が、1935年には、溶接部に沿ってフラックスを供給 (弁を開くと自重で出る) し、その中にワイヤを供給して溶接するサブマージアーク溶接が、そして 1948年には不活性ガス中に連続して送給したワイヤ電極からアークを発生させ、そのアーク熱で自ら溶融し溶接金属を形成させるミグ溶接が開発されました。その後、1953年には電導性の溶融スラグに電流を流して高温にし、連続的に溶接棒を供給して母材と共に溶融するエレクトロスラグ溶接が、1963年にはアークをプラズマジェット中で緊縮することによって高密度の熱を発生させるプラズマアーク溶接が開発されました。



図 5 アーク溶接の礎を築いた科学者と、ベルナルドが出願した特許

4. 溶接の材料科学

図6はアークによる溶融金属の流動を模式的に描いたものですが、大別して四種類の対流により溶融金属は攪拌されます。電極から発生したアークは金属を溶かしますが、溶けた部分を溶融池と称します。アークはフレミングの左手の法則により絞られ、中心部が端部より高い圧力となります（ピンチ効果と称します）。ピンチ効果によりアークの中心部と端部で圧力差が生じ、溶融池中の金属は図6(a)中の矢印のような対流を起こし、これを電磁対流と称します。一方、電極先端部の電流密度は母材表面ほど高いために、電極から母材に向かってプラズマ気流が発生し、図6(b)の矢印のようなプラズマ対流を発生させます。更に、温度の関数である表面張力は自由表面に温度の不均一があると差が生じ、それを補おうとして図6(c)のような対流が発生します（マラゴンニ対流）。最後は、密度に起因する対流ですが、アーク直下は高温のために密度が低下し、下部が熱せられると図6(d)のような対流が起こります（熱対流）。これらの対流は、溶接金属を均一にするだけでなく、被覆剤（フラックス）と溶融金属の反応を促進し、溶接部の健全化に寄与します。

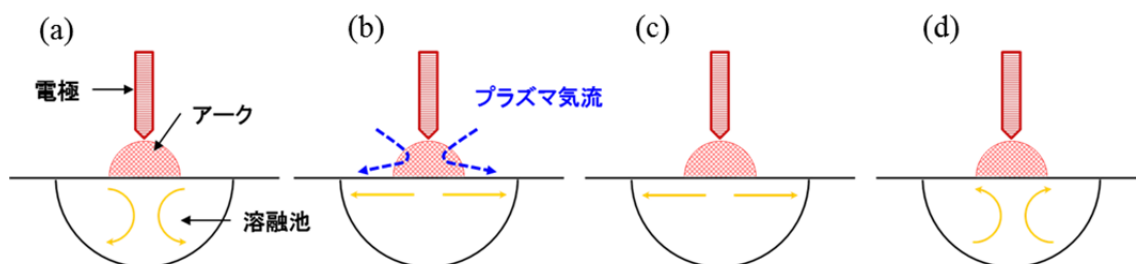


図6 アークによる溶融金属の流動

溶接は継ぎ手素材を一旦液相にしてから冷却により固相としますので、その熱履歴によって溶接材の組織や組成の分布が影響を受けます。図7は横軸に時間、縦軸に温度で、物質の状態を記した一次相変態のTTT (Time-Temperature-Transformation) 線図の模式図です。融点以上の液相は通常の冷却（緑線）では時間と共に、固相へと変態しますが、急冷（水色線）を施すと、過冷却液体をへて非晶質に変わります。非晶質とは、原子や分子が乱れた配列をした固体で、構造的には液体と見なすことができます（非平衡状態と称します）。一方、液相と固相の自由エネルギーの差は、過冷度 ΔT の関数として(1)式のように記すことができます。

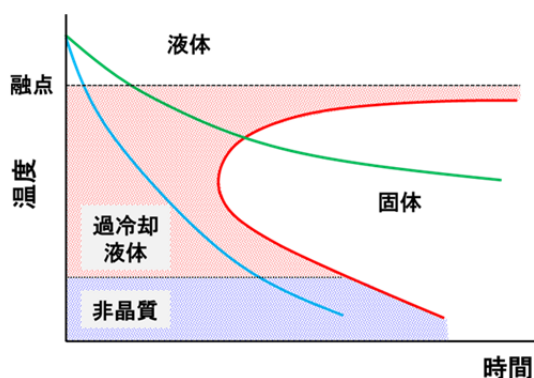


図7 一次相変態のTTT線図の模式図

$$\Delta G^{L-S}(T) \approx \frac{L_M}{T_M} \cdot \Delta T - \Delta C_p^{L-S} \cdot \frac{(\Delta T)^2}{2T_M} \dots \dots \dots (1)$$

式中、 ΔG^{L-S} は液相固相間の自由エネルギー変化を、 T_M は融点を L は溶解の潜熱を、 C_p は低圧比熱を示します。(1)式からわかるように、 ΔG^{L-S} は過冷度 ΔT が大きいほど、小さくなり、図7で示したように液体状態に近い非晶質に近くなります。従って、溶接にあたっては ΔT を大きくしないことが大切です。

次に、液相から固相への相変態、すなわち凝固に伴う溶質原子の分配を図8を使って考えます。図8(a)のように温度 T_0 で C_0 組成の液相を凝固させるとき、 S_0 組成の固相と C_0 組成の液相は平衡となり、 S_0/C_0 を平衡分配係数 k と称します。溶接では継ぎ手の金属が合金化により融点が低下するのが一般的ですから

(逆の場合は溶接するほど高いエネルギーを加えることとなります)、 $k < 1$ となります。温度 T_0 で、溶質濃度を固液界面からの距離に対してプロットしたのが図8(b)です。温度の低下と共に連続的に凝固が進むときは、固液界面では温度 T に相当する C 組成の液相と S 組成の固相が平衡します。実際の液組成は(b)の赤線のように固液界面から離れるにつれて下ふくらみの放物線を描きますから、温度 T の時の組成 C と温度 T_0 の時の組成 C_0 間の直線的な変化より低くなります。そのような液相組成に対応する液相の温度を固液界面からの距離に対してプロットしたのが図8(c)の水色の線で、実際の液相温度(緑線)より高くなり、この状態を「組成的過冷」(水色の斜線部分)と称します。このような状態になると、わずかな揺らぎで固液界面で局所的に固相反応(結晶成長)が助長され、界面の微小な突起先端の発達を促進し平滑な界面が不安定となる結果、デンドライトと称する樹枝状結晶が形成されま

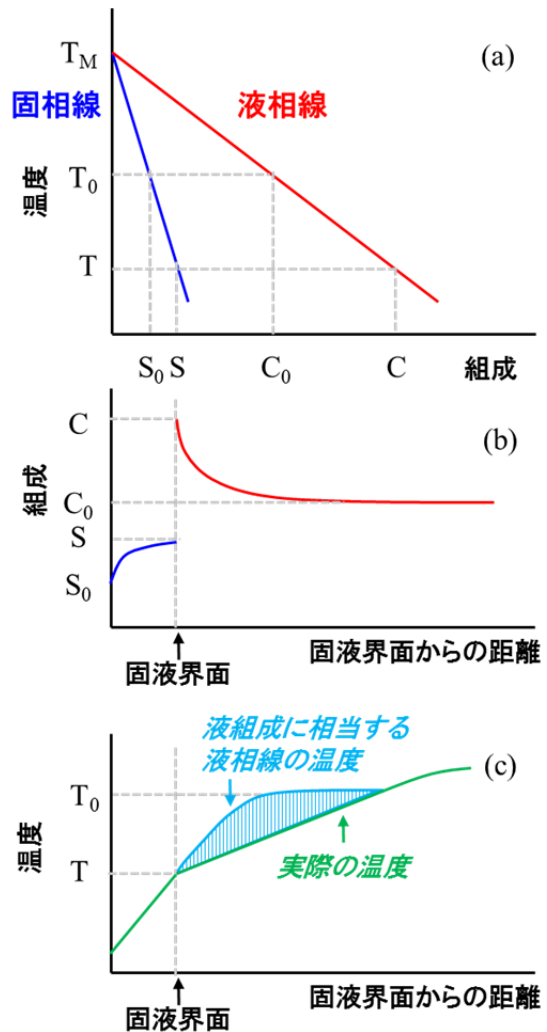


図8 凝固過程での状態図(a)、溶質原子の分布(b)、温度分布(c)

次に元素の偏析について紹介します。図 8(a)からわかるように、凝固する固相の溶質濃度は液相の溶質濃度よりも低く、冷却と共に溶質元素は順次、外側に追い出されます。その結果、溶質元素は最後に凝固する領域に濃化するため、溶接金属の結晶粒界には溶質元素が偏析し易くなります。すなわち、凝固温度に幅が存在するとき、組成には不均一がおこり、この時マクロ偏析とマイクロ偏析と称する偏析が発生します。マクロ偏析は初期に冷却する領域では溶質元素の濃度が低く、最後に凝固する領域で高くなる偏析で、上記の場合に相当します。一方、マイクロ偏析とは、デンドライトの幹部で溶質濃度が低く、樹枝間や樹間で濃度が高い偏析です。図 9 は初期濃度が C_0 の液相が存在する場合、凝固に伴う溶質濃度変化を模式的に記したものです。液相が流動し濃度が均一で、固相の拡散が無い場合、固相濃度 C_s は(2)式に示されるシャイルの式が成立し、図 9 の赤線のような変化をします。

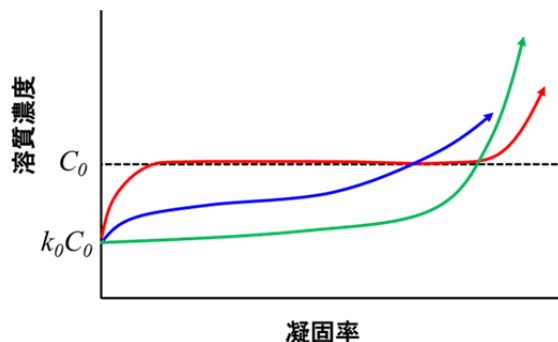


図 9 凝固に伴う溶質濃度変化

$$C_s = k_0 C_0 (1 - g)^{k_0 - 1} \dots \dots \dots (2)$$

式中、 g は液相の分率を、 k_0 は上述の平衡分配係数です。一方、液相中に流動があり、界面近傍は拡散が支配するような場合、界面から離れたところは濃度一定となり、図 9 の青線のような変化となります。そして、液相に流動が無く、溶質原子の分布は拡散に支配されるような場合、凝固開始後の短時間に定常状態となり、図 9 の緑線のような変化をします。いずれの場合も凝固が進むにつれて（凝固率の増加に伴い）、溶質原子は固相から順々に掃き出され、最終凝固部で溶質濃度は増加することとなります。定常の凝固では凝固の始端と終端以外では、初期濃度 C_0 の均一な固相になりますが、凝固速度が定常でない場合、凝固速度が速いと溶質濃度が濃化し、遅いと希薄となり不均一な偏析が発生します（図 10）。

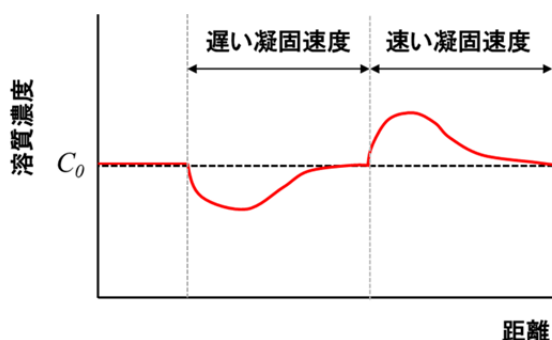


図 10 凝固速度の違いによる溶質濃度変化

5. 溶接金属の組織

溶接は金属が急速に加熱冷却されるため、その熱履歴に応じた組織変化が現れ、溶接性能に大きく影響を与えることが知られています。図 11 のように溶接金属の周辺の溶接熱で組織変化を起こす領域を、熱影響部 (Heat-affected zone : HAZ) と称します。この領域は、金属は溶融していませんが焼入れと同等の熱処理が付与され、溶接金属や母材より硬度が高く靱性が低下するだけでなく、水素固溶による水素脆化が起こりやすくなります。鋼の場合、HAZ はオーステナイト化温度以上に加熱されるため、溶接前の組織が壊れ冷却により生じる組織が製品の性質を決めることとなります。溶接金属と HAZ との溶融境界部は、融点以上に加熱され、母材側に遠ざかるにつれ溶接時に加熱される最高到達温度が低くなりますから、この温度分布に伴って組織が変化します。一方、溶接金属は溶接ワイヤーと母材金属が溶融凝固した領域で、図のように母材に接する部分に柱状晶が晶出し、最後に凝固する領域が等軸晶になります。凝固は溶融境界部から熱流方向と逆方向に進みますから (図 12(a) の赤点線の矢印の向き)、母材結晶が結晶核の役割をして、溶接金属の結晶は母材結晶粒と同一方向に成長しようとしています。そのため溶接金属部では最初に凝固する領域で柱状晶が観察されます。この時、溶接金属の結晶粒の方位は、図 12(b) のように、母材結晶粒の方位を引き継いで凝固しようとしています (bcc の場合は $\langle 100 \rangle$ 方位)。

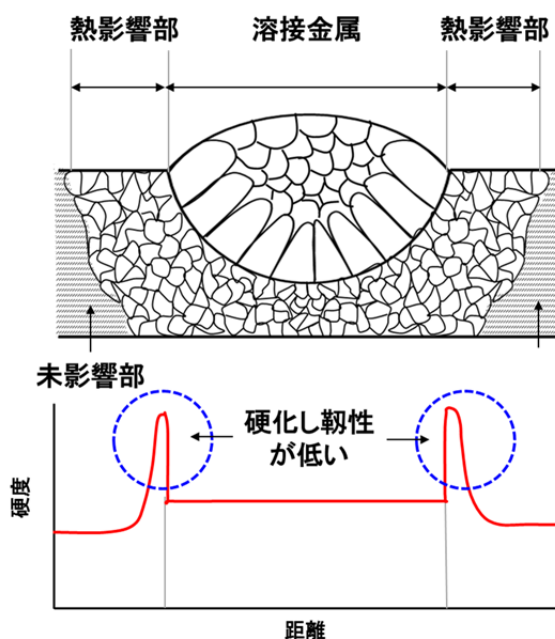


図 11 溶接金属の組織と硬度分布

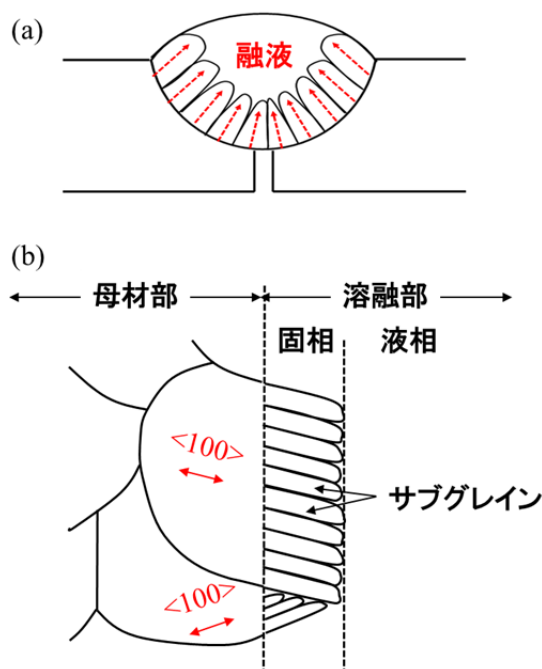


図 12 溶融境界部の結晶粒成長

図 13 に鋼の HAZ における入熱後の温度の経時変化を、Fe-C 状態図と併せて記します。各箇所温度は時間と共に上昇し、最高温度に到達後に徐々に低下しますが、溶接金属から離れるにつれて (①→②→③・・・)、最高到達温度は低下します。一方、HAZ の外側の⑥の母材部では、温度は単調に増加します。領域①は最高到達温度が A_3 点以上のため、鋼は γ 変態を起こし、温度が高いために結晶粒は粗大となります。領域②は領域①と同様に、 γ 変態を起こしますが、領域①ほど温度が高くないために、結晶粒は混粒となります。領域③は、最高到達温度が A_3 点以上ですので、 γ 変態はおこしますが、温度が低いために γ 粒は成長できず微細となります。また冷却条件によってはパーライト変態が起こり易くなります。領域④では、最高到達温度が A_1 点と A_3 点の間にありますから、パーライトの一部が γ 粒になった後、冷却で球状パーライトへと変化します。そして HAZ と母材の境界部である領域⑤は顕著な組織変化はありませんが、HAZ 同様に靱性の低い脆化域に属します。

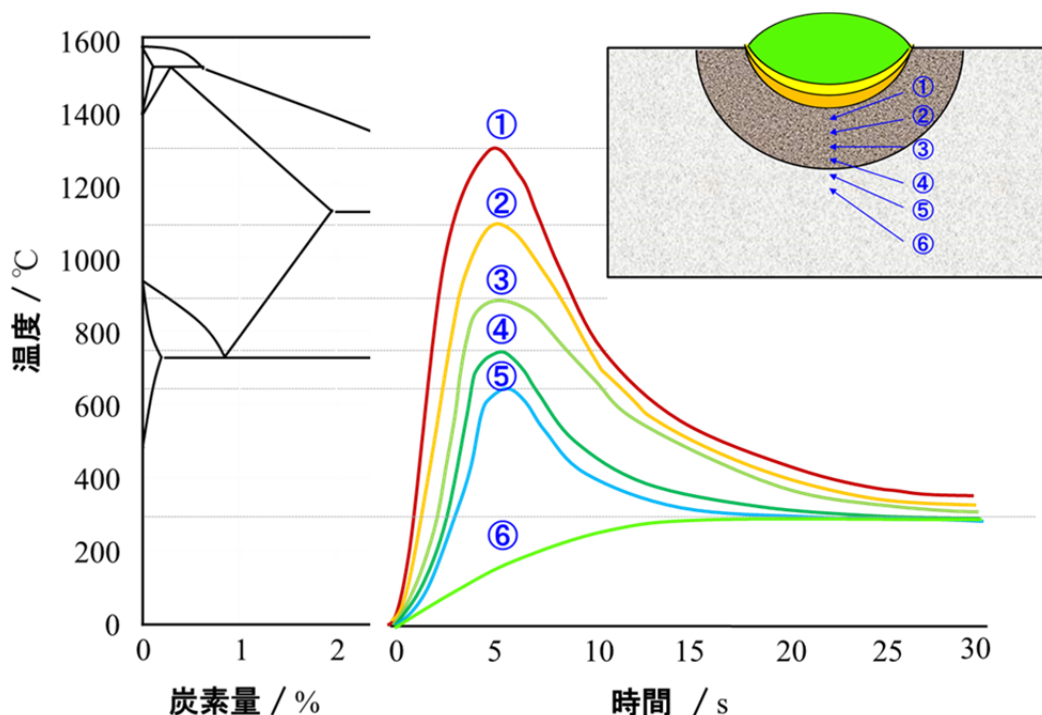


図 13 熱影響部の温度の経時変化

図 11 のように HAZ 部の硬度は著しく高くなりますが、硬化部にある値以上の応力が働くと、溶接後 HAZ 部で割れが発生し、これを「低温割れ」と称します。そのため、低炭素当量の鋼材を使用し (マルテンサイト形成を抑制)、応力集中を低減できる継手を設計し、予熱 (冷却速度を遅くする) による硬化抑制などの対策が取られています。また、低温割れは、大気中や材料中の水素が溶接金属中に浸入す

ることも要因です。アーク雰囲気では、水素は解離して原子状水素として溶接金属に浸透し、金属の結合力を低下させ、空孔や粒界等の空隙を形成して脆化を引き起こします。図 14 はアーク溶接雰囲気中の水素とアーク溶接を施した鉄中の水素量の関係ですが、雰囲気中の水素量が高いほど溶接金属中の水素量の増加が判ります。そのため低温割れの防止には水素量の少ない溶接材料や方法を選択します。一方、大入熱溶接の場合、溶接金属内部か母材加熱部では粒界割れが起こりやすく、これを「熱間割れ」と称します。これは、粒界に低融点物質や介在物が集積することで、凝固直後に収縮応力が発生するために発生します。以上のように溶接割れの原因は、①HAZ 部の硬化、②残留応力、③水素に集約でき、上述のような様々な対策が考えられています。

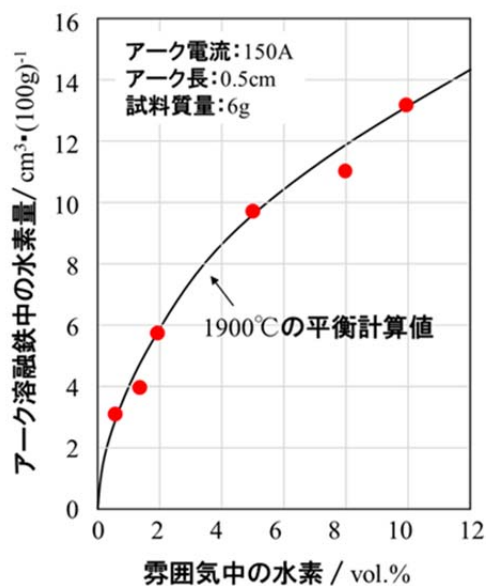


図 14 アーク溶接雰囲気中の水素と溶接鉄金属中の水素量のプロット
(Br. Weld J. 10(1963)316 より)

6. 摩擦攪拌接合

前節に紹介した溶接割れの原因は、どれも溶接材が金属の融点以上まで加熱されることに起因します。そのため、融点以下の温度で接合させる「固相接合」が注目されますが、例えば代表的な固相接合である拡散接合では、接合性を左右する原子拡散は熱に依存するため、融点以下の温度では十分な拡散がおこらず、健全な接合体を得ることが難しく、「固相接合」には限界がありました。

1991 年、英国の The Welding Institute (TWI) は摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW) を発明し、自動車・鉄道車輛・航空工業など様々な分野で採用されました。図 15 に FSW の模式図を示します。まず、Stir Rod と称する中心に突起 (pin) を持ったツールを接合部に対して加圧進入後に回転し、摩擦熱を発生させます。この摩擦熱により材料は軟化しますが、ピン周辺材料はツールの回転に引きずられて塑性流動を起こし、進行と共に順次、材料の可塑化が起こり、接合が進行します。このように、FSW は摩擦熱による材料軟化

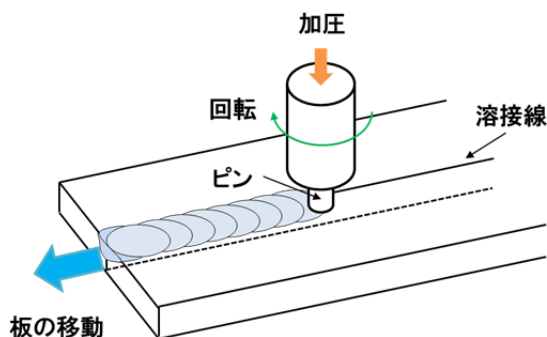


図 15 摩擦攪拌接合の模式図

と塑性流動が基本のため、アルミニウムや銅などのように比較的強度が低い材料の接合に採用されてきましたが、最近では Stir Rod の加圧力を高め、高温強度や耐摩耗性に優れた素材を pin 材に用いることで、鉄鋼への適用例も報告されています。航空機部材の接合では、通常の熔融溶接に伴う欠陥導入のリスクを回避するために、信頼性が高く取扱いに優れたリベットのような永久接合か、ボルト・スクリューなどのリムーバブル接合や接着接合、そして拡散接合などの固相接合が利用されています。特に高速飛翔体に多用されるチタンの場合、加工工数を低減するために、超塑性加工と拡散接合を一体化した複合プロセスが採用されています。FSW はこうした分野でも適用が始まっており、将来への有望な接合技術と考えます。

7. 最後に

一台の車には 4000 種類で 2 万個以上の部品があるそうですが、それらの部品を繋ぐ車には多くの接合部が存在することになります。パソコンや携帯電話に使用される IC 基板には配線材が基板に接合され、一見、一体ものに見える刀も実は軟らかい鋼と硬い鋼の圧接材です。接合が重要なのは、私達の身の回りにある製品が、小さいものから大きいものに至るまで、一つの物質や部品で構成されることが少ないことに他なりません。物と物を繋ぐには、間に何もなければ、間に接着剤をはさむかのどちらかです。前者では界面は一つですが、後者では界面は二つになります。接合界面は母材とは異なる組織や組成分布が現れやすく、残留応力が高くなりやすいため、接合の健全性を確保するには界面が重要な役割を果たします。

最後に溶接技術の推移をロボット溶接の観点から紹介します。1975 年に我が国の自動車用スポット溶接ロボットと造船用隅肉自動溶接ロボットが国際ウェルディングショーで展示されました。その後、1977 年に多関節溶接ロボットが、1983 年には多層盛溶接ロボットが開発されました。これらのロボット溶接は、早速、自動車、建造物、パイプライン等の産業分野に導入され、煩雑で個別誤差補正の難しい溶接作業が自動化されました。我が国のロボットの商業生産の黎明は 1969 年の油圧ロボットですが、その実用は同時期に開発された自動車用スポット溶接でした。このように、我が国の高いロボット技術を先導したのが、溶接であったことが判ります。



写真 2 2013 年国際ロボット展での自動車ライン溶接 (<http://robotics.sblo.jp/article/80148099.html>)