

溶接・接合の基礎

ものづくり基礎講座（第40回技術セミナー）

『金属の魅力をみなおそう 第二弾 プロセス技術編 第三回』

東北大学金属材料研究所

正橋直哉

masahasi@imr.tohoku.ac.jp

2014年6月11日 14:05~14:35

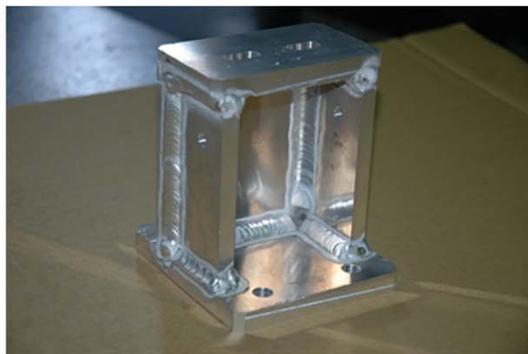


Kansai Center

クリエイション・コア東大阪 南館3階 技術交流室A



東北大学



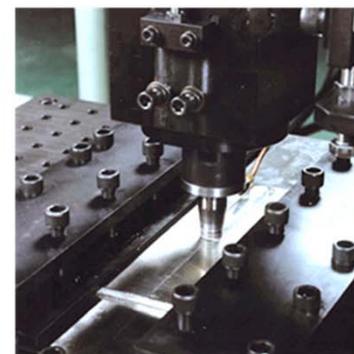
アルミニウムの全周隅肉溶接



配管とフランジを接合



金属と石英ガラスの接合



摩擦攪拌接合



柱梁をホールダウンコーナー接合



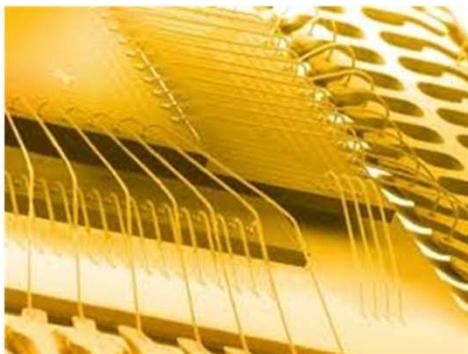
木材のフィンガージョイント



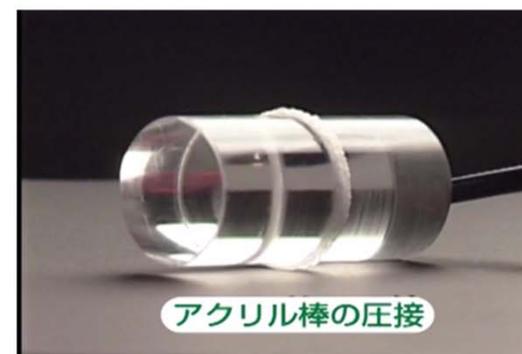
橋脚直上のピン接合



摩擦接合用ボルト



金ボンディングワイヤー



アクリルの圧接

- | | | |
|--------|--------------|-------------------------------------|
| BC2500 | 銀ろう付 | ヘレス王妃の墳墓から出土した天蓋は、銅柱支持部を銀のろう付で固定。 |
| BC2400 | 金はんだ付 | メソポタミアウルに住むカルデア人は、金の延べ板の接合にはんだ付を使用。 |
| BC1345 | 金ろう付 | ツタンカーメンの墓から、金粒を金の延板表面に加熱接合した装飾品が出土。 |
| BC1000 | 鉄の鍛接 | 中近東で鉄製武器の製作に鍛接を使用。 |
| BC1000 | 銅ろう付 | スサ出土の銅製の壺に、雄牛の頭部の装飾品をろう付で固定。 |
| BC1000 | 青銅ろう付 | 発掘されたケルト人の使っていた青銅器に、折れた柄をろう付で補修。 |
| BC800 | 鉄の鍛接 | メソポタミアのニムド出土の青銅製の椅子に、鉄のリングが鍛接により固定。 |
| BC100 | 鉛はんだ付 | ローマの水道管の鉛管継手のはんだ付けで固定。 |

<http://www.sanpo-pub.co.jp/upload/images>より抜粋



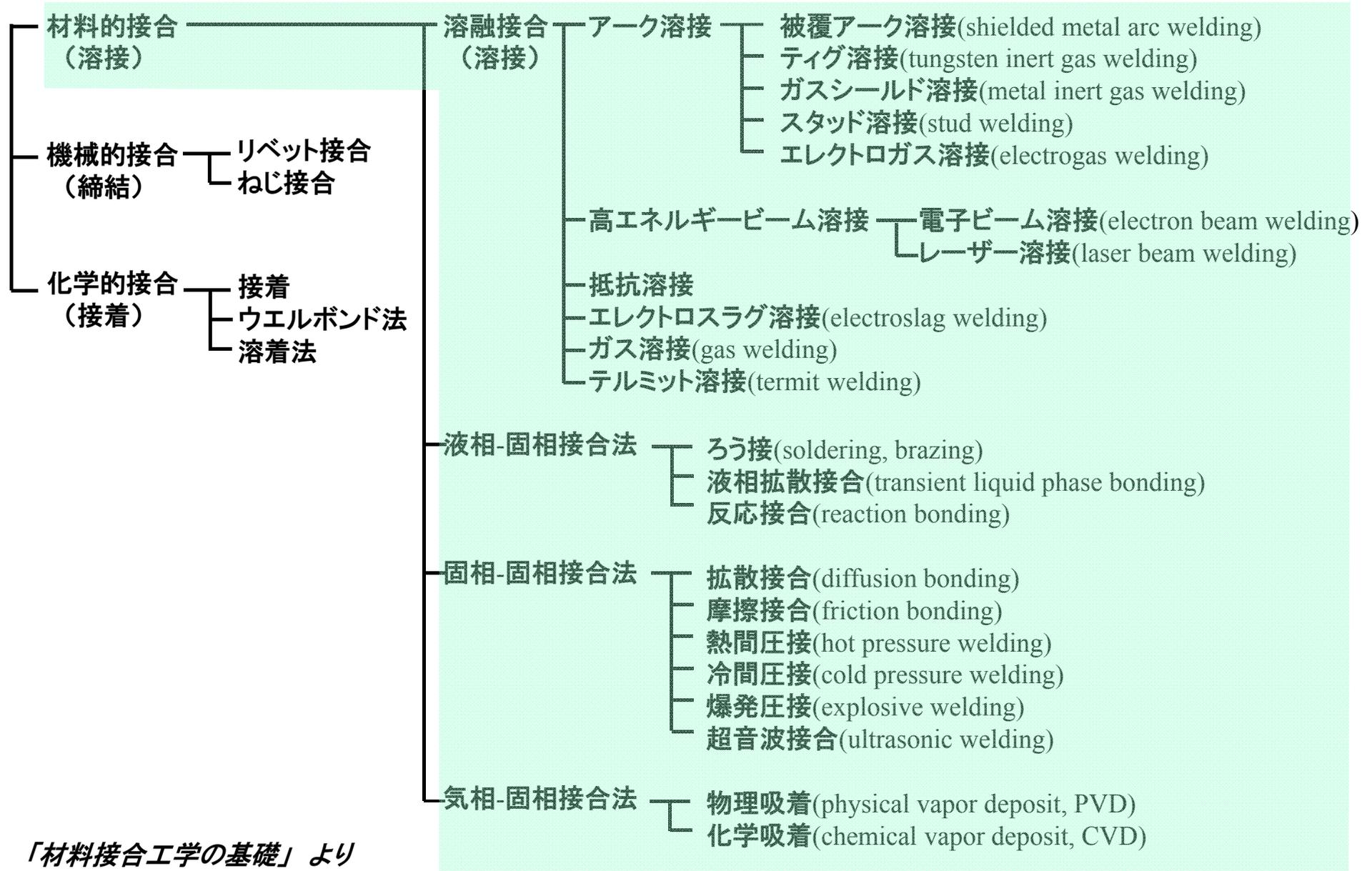
古代ギリシャ(BC300年頃)の王冠



エジプト第18王朝(BC1570
-BC1293)の王冠



ローマ(BC1000年頃)の鉛製水道管



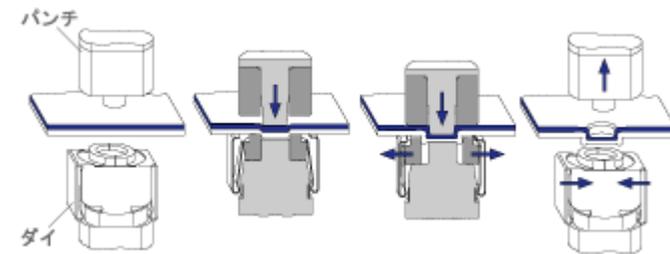
被加工材またはリベット等の結合補助材の変形を利用して接合する技術

長所 ① 簡便な工具で容易に組立解体ができ、信頼性の高い接合が可能

② 破断が生じても接合部で進展が防げる

短所 ① 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、工数が多くなる

② 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



パンチで材料をダイに押し付けて材料そのものを機械的に接合するため、複数の薄板をワンストロークで接合することが可能

リベット接合

セルフピアスリベット

クリンチング

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)した接合

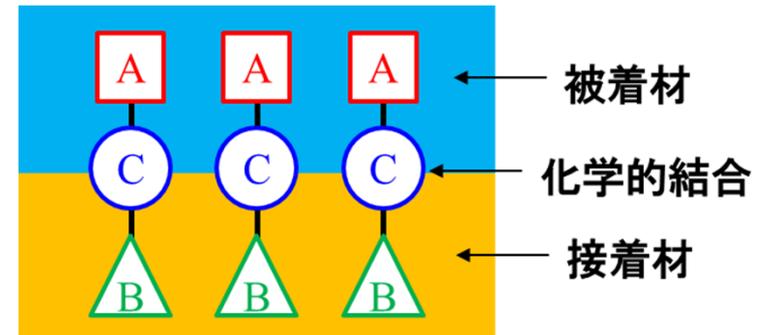
- 長所① ほとんどの材料や異材の接合ができ、素材の性質や形状を変化させない
- ② 気密・水密性が高く、製品の外観品質に優れ、電氣的・熱的絶縁が得られる
- 短所① 固定をするのに時間がかかり、継手の耐熱性に限界がある
- ② 継手の信頼性や耐用年数に関するデータが少ない



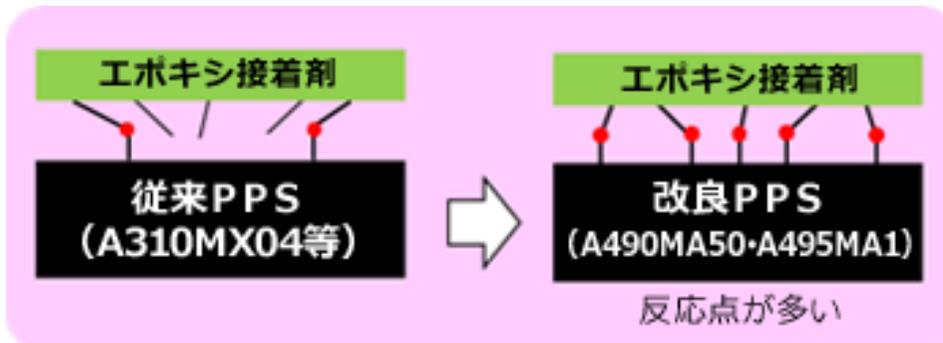
瞬間溶着材



高周波溶着



化学的相互作用



化学的接合力の向上手段

2つの金属を溶かして混ぜ合わせた接合が溶接だが、溶かすまで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がある。

長所① 継手形状が簡単で自由度が高く、短時間で接合できる

② 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

短所① 歪みや残留応力が発生し、寸法精度維持が困難で欠陥が発生しやすい

② 解体が難しく破断を止めることが難しく、機械的性質や形状の不連続が発生



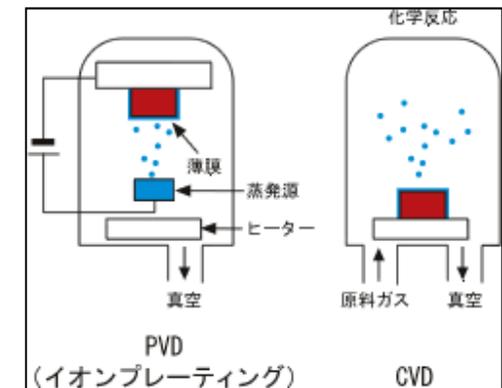
アーク溶接



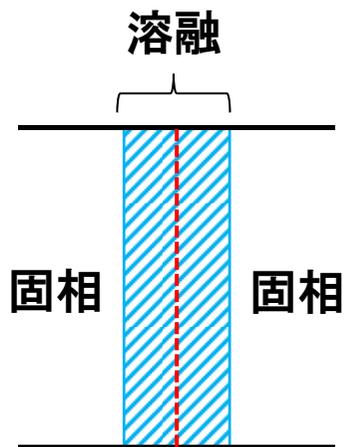
ろう溶接(液相-固相)



摩擦圧接(固相-固相)

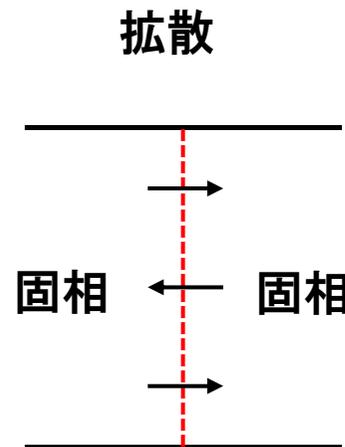


PVD/CVD(気相-固相)



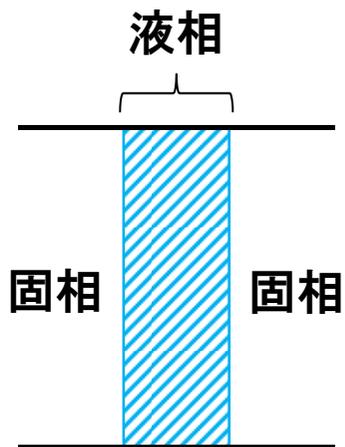
固相を突き合せ界面を局部的に加熱して熔融し接合させる。

熔融接合法



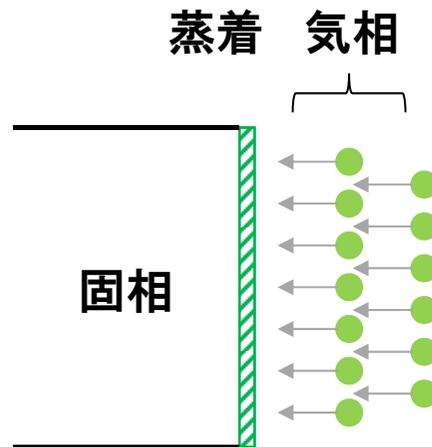
温度を上げて、固相間で原子を相互に拡散させて接合させる。

固相-固相接合法



固相間に低融点物質を配置し、この物質を液相にして接合させる。

液相-固相接合法



固体表面に所望の物質を気相にして蒸着する。基板となる固体は固相のまま変わらない。

気相-固相接合法

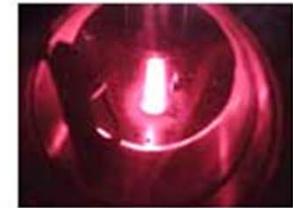
マイナスの値が大きいほど結合しやすい

	Y	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	Pd	Cu	Ag	Au
Li	11	44	55	50	38	12	1	71	-58	-15	-26	-53
Na	41	88	104	100	89	57	46	135	-21	14	0	-22
Mg	-12	13	31	32	23	1	-8	50	-63	-13	-19	-49
Zn	-54	-42	-13	-3	-5	-18	-23	6	-59	-11	-8	-28
Al	-68	-67	-40	-30	-32	-42	-48	-24	-84	-17	-10	-37
Ga	-73	-60	-28	-16	-18	-31	-37	-7	-79	-15	-11	-34
In	-67	-36	2	14	13	-5	-12	31	-63	-4	-4	-21
Tl	-65	-26	16	30	30	11	4	50	-47	4	3	-8
Sn	-91	-62	-19	-3	-2	-16	-22	10	-69	-8	-6	-21
Pb	-86	-44	4	22	25	8	2	41	-46	4	4	-3
Sb	-116	-83	-31	-9	-4	-16	-20	3	-53	-8	-6	-13
Bi	-98	-55	-5	15	18	2	-4	33	-52	1	2	-4

電氣的
エネルギー

- アーク
- プラズマ
- グロー放電
- 抵抗
- 高周波
- 電子ビーム
- イオンビーム

アルゴンアーク ≈ 5 、プラズマアーク 50~100



アーク

化学的
エネルギー

- ガス
- テルミット
- 爆発

酸素-アセチレン ≈ 1 、酸素-水素 ≈ 3



電子ビーム

機械的
エネルギー

- 摩擦
- 圧接
- 衝突



摩擦接合



圧接



テルミット



グロー放電

光
エネルギー

- 光
- レーザー

太陽集光 1~2、キセノンランプ集光 1~5
連続 100以上、パルス 10,000以上

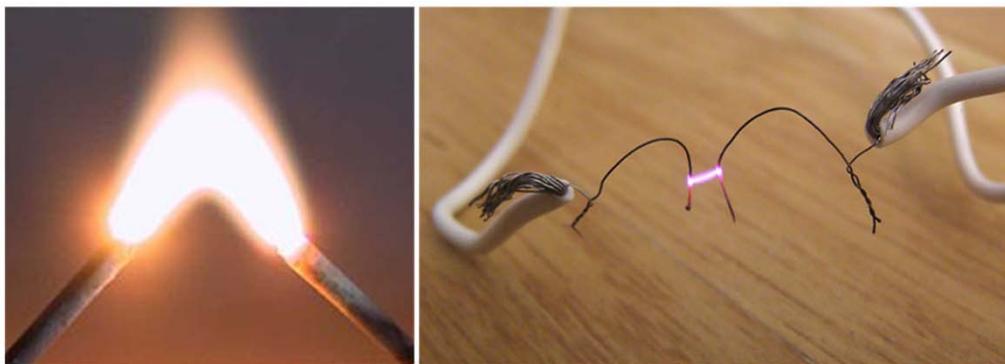


レーザー溶接

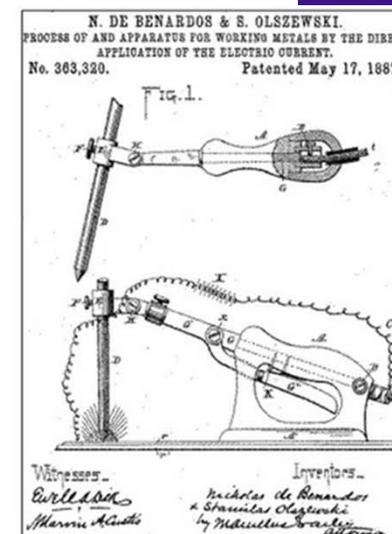
超音波
エネルギー

「材料接合工学の基礎」
エネルギー密度の単位は kW/cm^2

電極間に電位を加えると、電極間の気体が電離し励起状態となり電流が流れ、高温と閃光を伴う絶縁破壊（放電）を起こす。



アークは1800年に英国の化学者デービーが蓄電池を使って実証



ベルナルドの出願特許



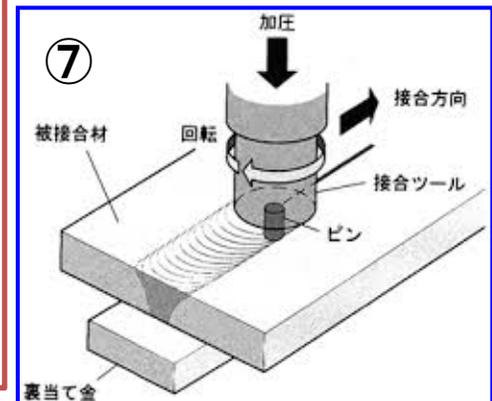
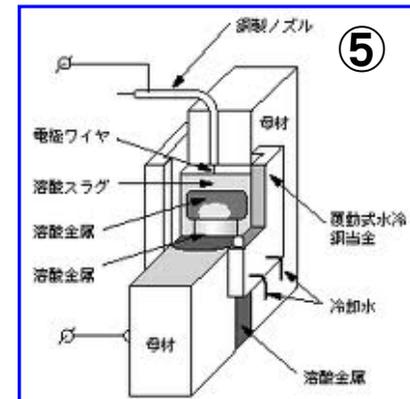
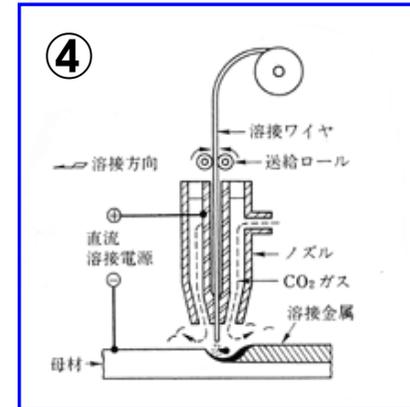
N. N. Bernardos (1842-1905)

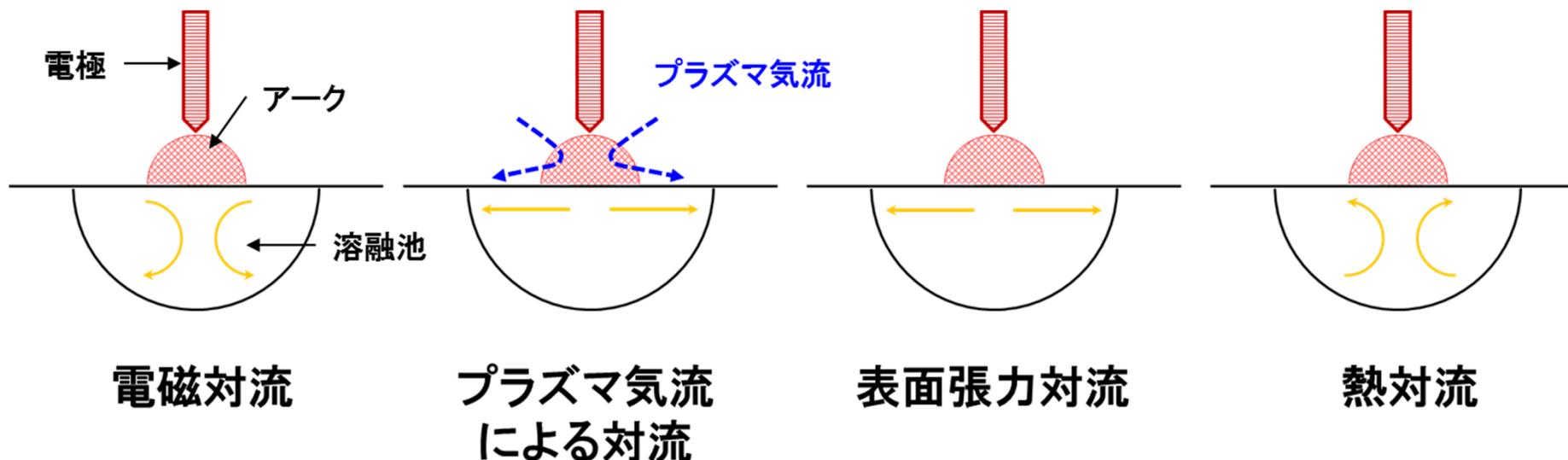


N. G. Slavyanv (1854-1897)

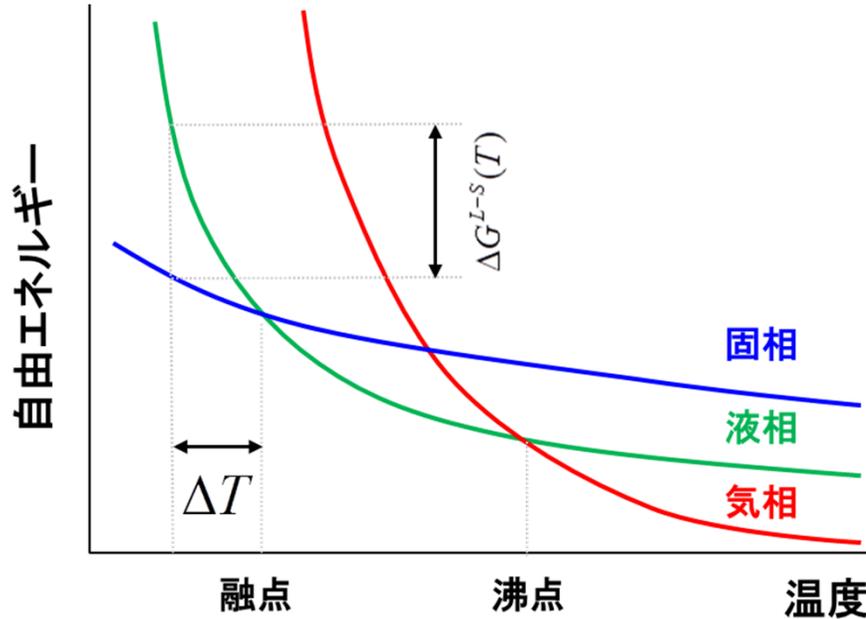
アーク溶接:アークを母材と電極間に発生させて得た熱で母材や溶加材を溶融し、分子原子レベルで融合一体化する接合法を称する。1887年にロシアのベルナルド(N. N. Bernados)が、母材とホルダで挟んだ炭素棒を電極とし、横から溶加材を添えてアーク点を移動させることで初めて溶接に成功した(非消耗電極)。その後、スラビヤノフ(N. G. Slavyanv)が被溶接材料と同じ材質の裸溶接棒を電極として用い(消耗電極)、アークを発生させて今日のアーク溶接の基礎を作った。

- ①1907年: チェルベルヒが被覆剤(フラックス)を塗布した溶接棒を使用し、アークの発生・継続を容易にした。
- ②1930年: 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)。
- ③1935年: 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)。
- ④1948年: 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(ミグ溶接)。
- ⑤1953年: 電導性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母材と共に溶融する溶接(エレクトロスラグ溶接)。
- ⑥1963年: 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)。
- ⑦1991年: 工具を加圧回転させて接合部に貫入し、摩擦熱発生のもと接合部周辺を塑性流動させ一体化する接合(摩擦攪拌接合)。





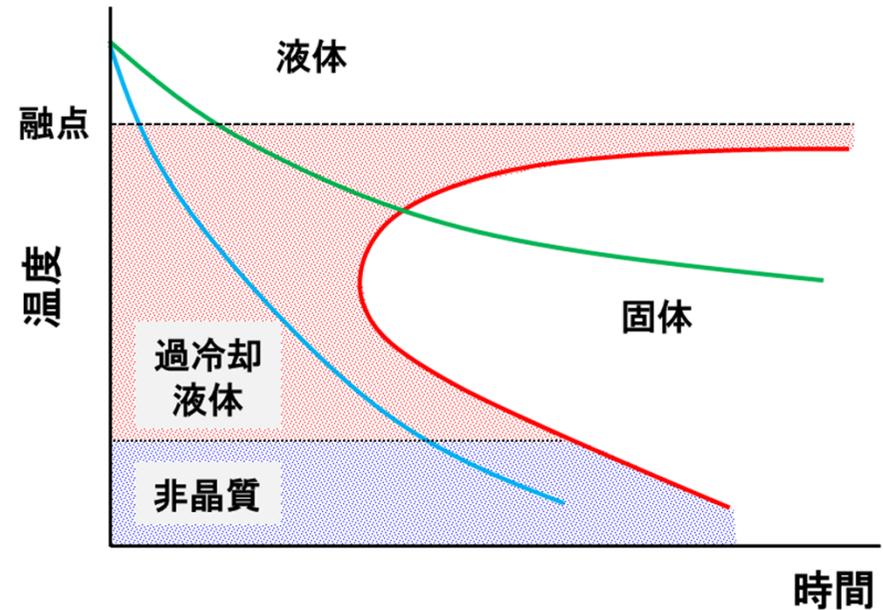
- ①電磁対流:電子束(アーク)は、フレミングの左手の法則により絞られ、中心部が端部より高圧力となる(ピンチ効果)。
- ②プラズマ気流:電極先端部の電流密度は母材表面より高いために、電極から母材に向かって気流が発生する。
- ③表面張力:温度の関数のため、自由表面に温度の不均一があると表面張力に差が生じ、それを補正しようとして流れが生じる(マランゴニ対流)。
- ④熱対流:密度は高温ほど小さくなるため、下部が熱せられると対流が生ずる。



純金属の各相の自由エネルギーの温度依存性

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

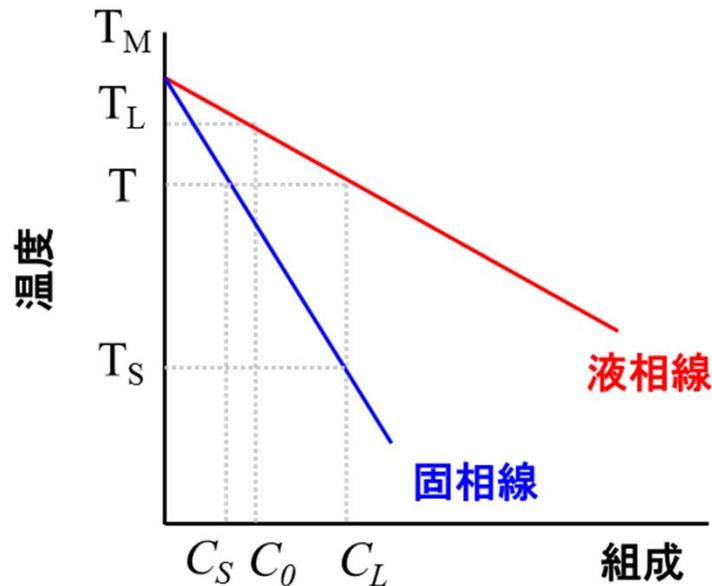
ΔG^{L-S} : 液相固相間の自由エネルギー変化
 T_M : 融点、 L_M : 溶解潜熱、 C_p : 低圧比熱



一次相変態のTTT線図の模式図

除冷: 高温相が低温まで凍結

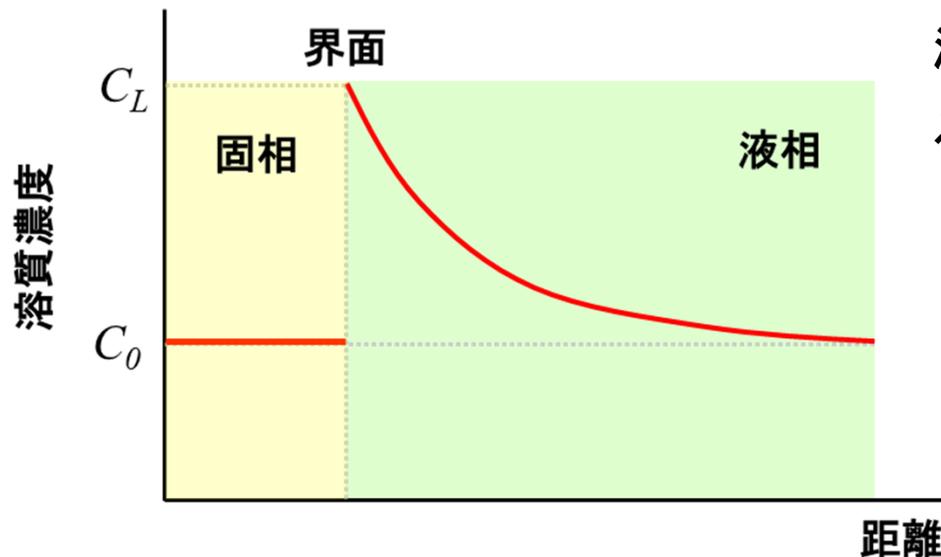
急冷: 液体状態が凍結



C_0 組成の液相が温度 T まで冷却すると、 C_S 組成の固相と C_L 組成の液相が平衡を保つ。

平衡分配係数 $k_0 = C_S / C_L < 1$

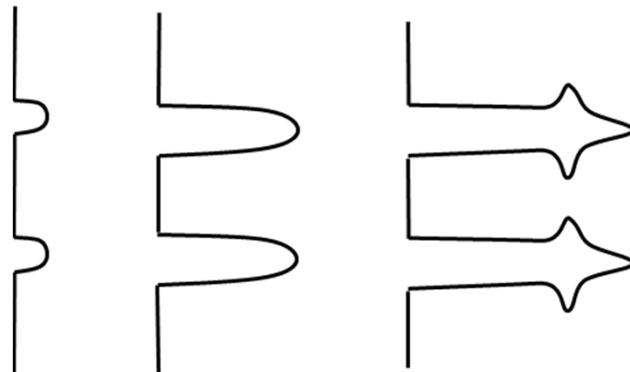
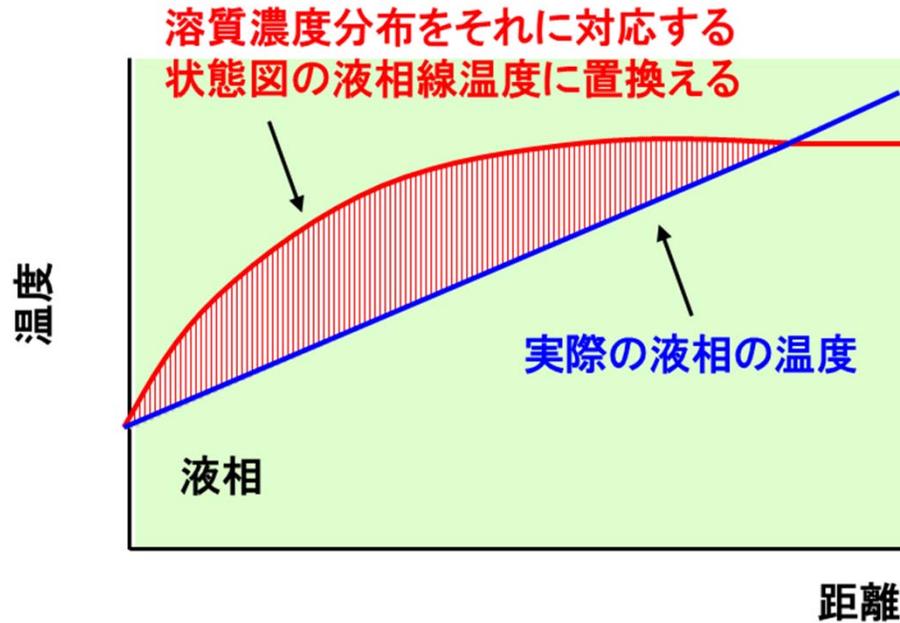
通常の凝固は固相中の溶質拡散速度が小さく平衡に従った元素分配は起こらない。 $k < 1$ の時、液体中の溶質濃度は高くなり、固相の溶質濃度も上がる。



液相で流動が無く溶質分布が拡散支配される時、凝固開始後短時間に定常状態となる

$$C_L = C_0 \left[1 + \frac{1 - k_0}{k_0} \cdot \exp\left(-\frac{R}{D} x\right) \right]$$

凝固終端では界面に溶質の濃化された液が凝固するため固相濃度は C_0 より高い



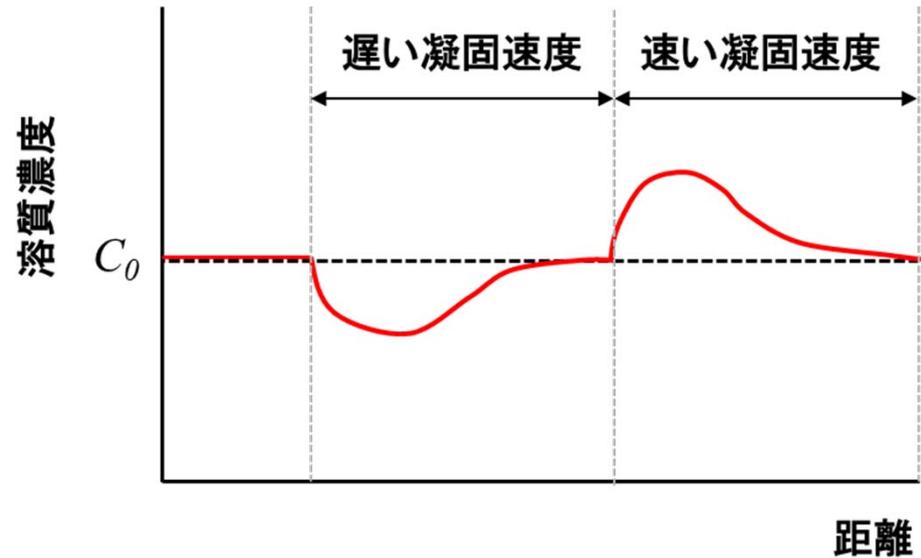
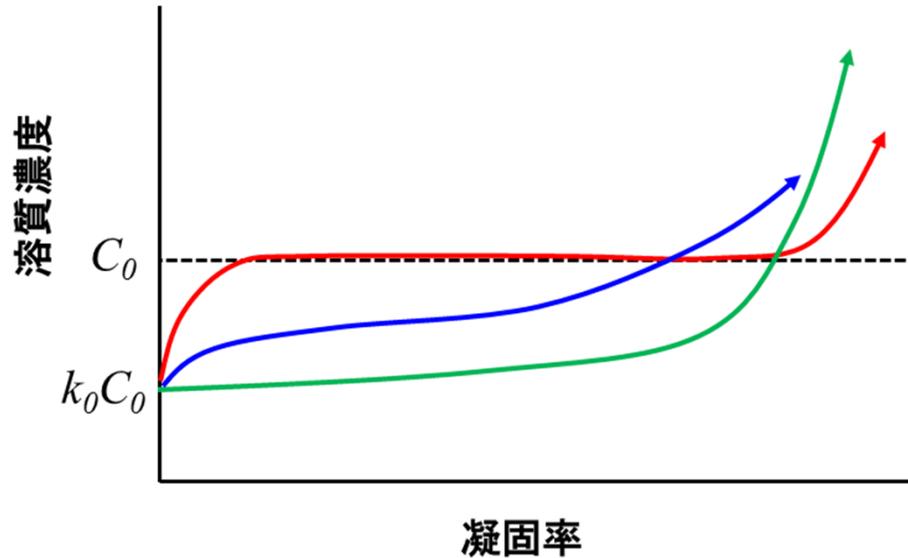
樹脂状晶(デンドライト)の成長

実際の液相の温度

固液界面では液相線温度とほぼ一致するが、界面前方の液中では熱拡散率が溶質の拡散率よりもはるかに大きいために青線のような直線形状になる。

液相中に実際の温度より低い部分(左図赤線ハッチング)、すなわち過冷却領域が発生し、**組成的過冷却**と称する。

組成的過冷却が発生すると、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**。



① 液相が流動し溶質濃度が均一な時

$$C_s = k_0 C_0 (1 - g)^{k_0 - 1} \quad \text{シャイルの式}$$

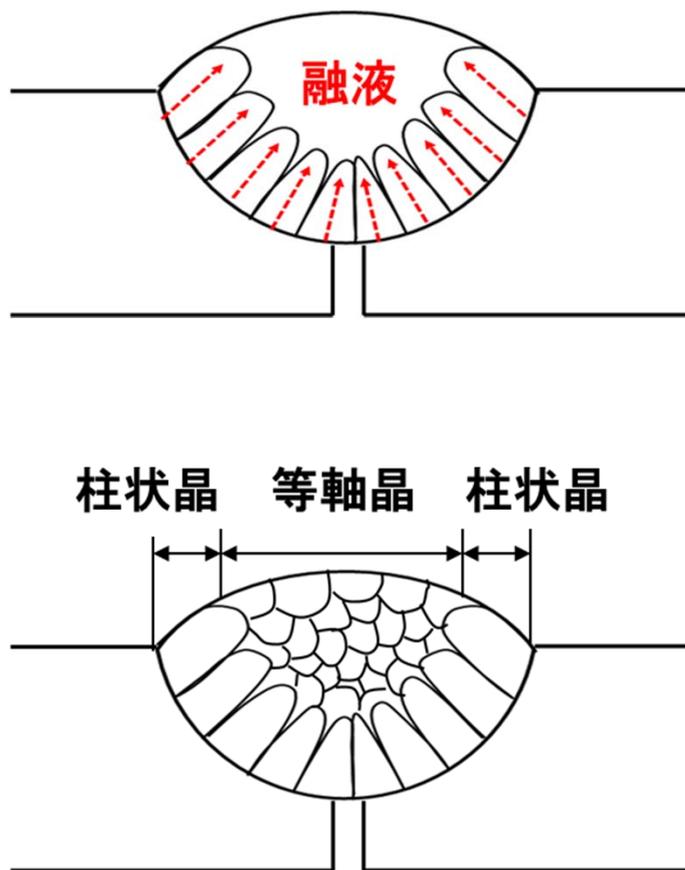
② 液中に流動があり界面から離れたところ

は濃度一定で界面近傍は拡散支配の時

③ 液相に流動が無く溶質分布は拡散に支配

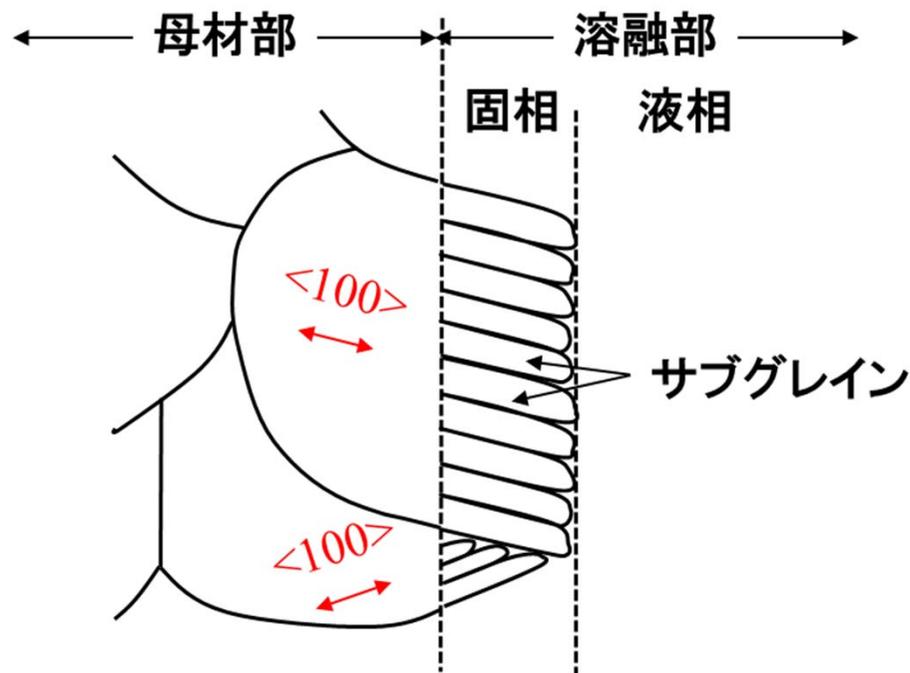
される時: 凝固開始後の短時間に定常状態

定常凝固では凝固の始端と終端以外では初期濃度 C_0 の均一な固相になるが、凝固速度が定常でない場合には溶質の不均一な偏析が発生する。具体的には、凝固速度が速いと濃化域が、遅いと希薄域が出現する。

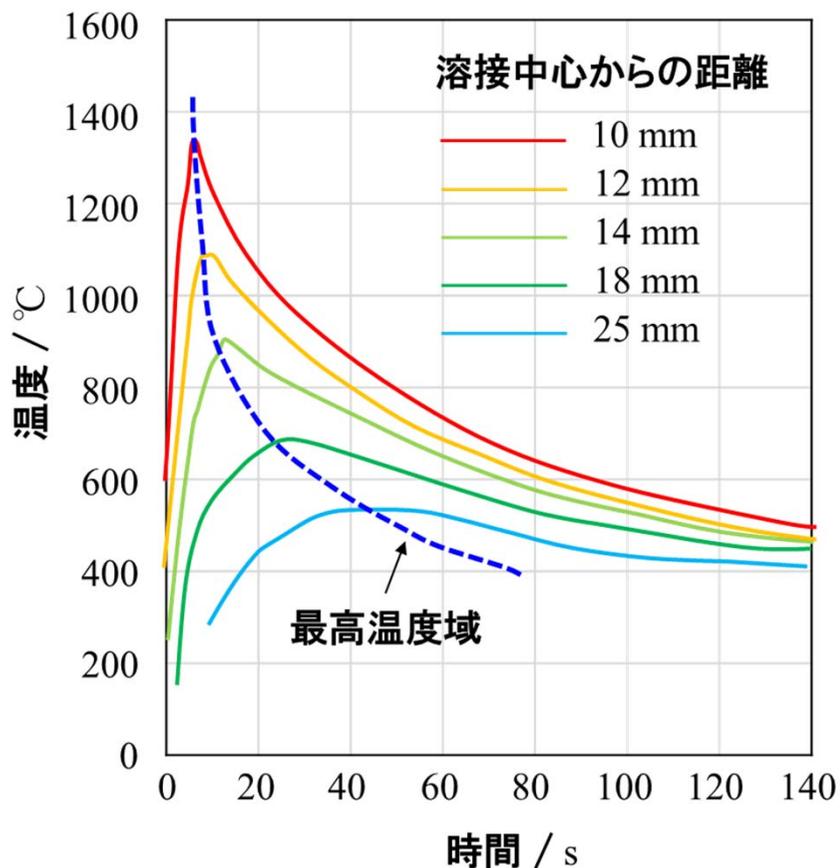


母材に接する部分に柱状晶が晶出し、最後に凝固する領域が等軸晶になることが多い。

凝固は溶融境界部から熱流方向と逆方向(赤矢印)に進み、母材結晶が結晶核の役割をし、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する

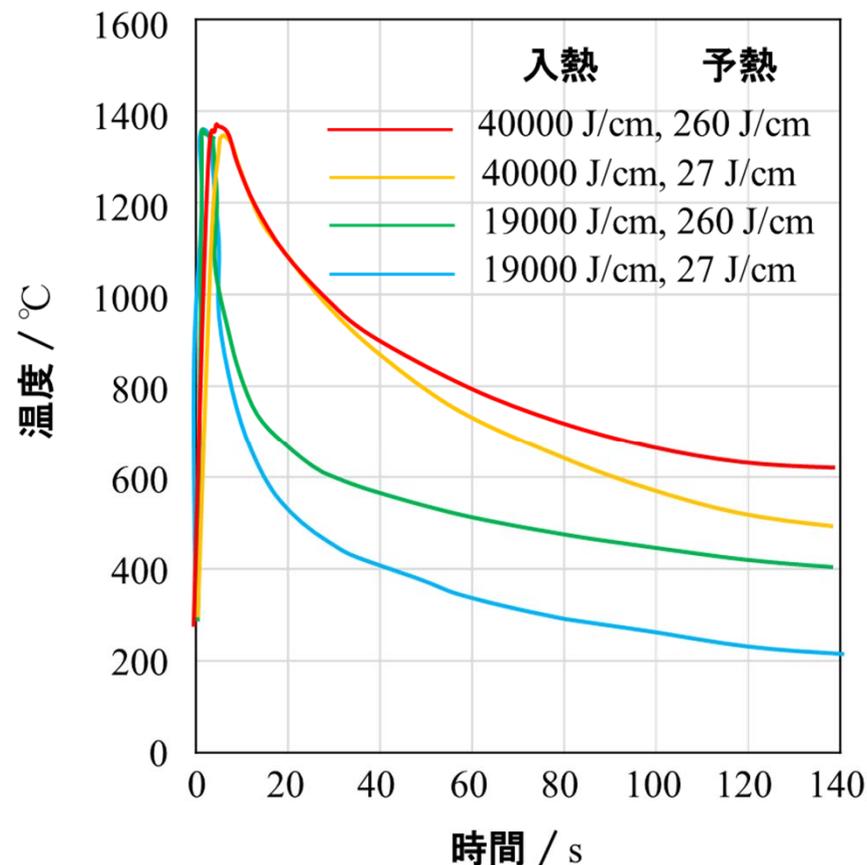


溶融金属の結晶粒の方位は、母材結晶粒の方位を引き継いで凝固する(bccの場合は<100>方位)



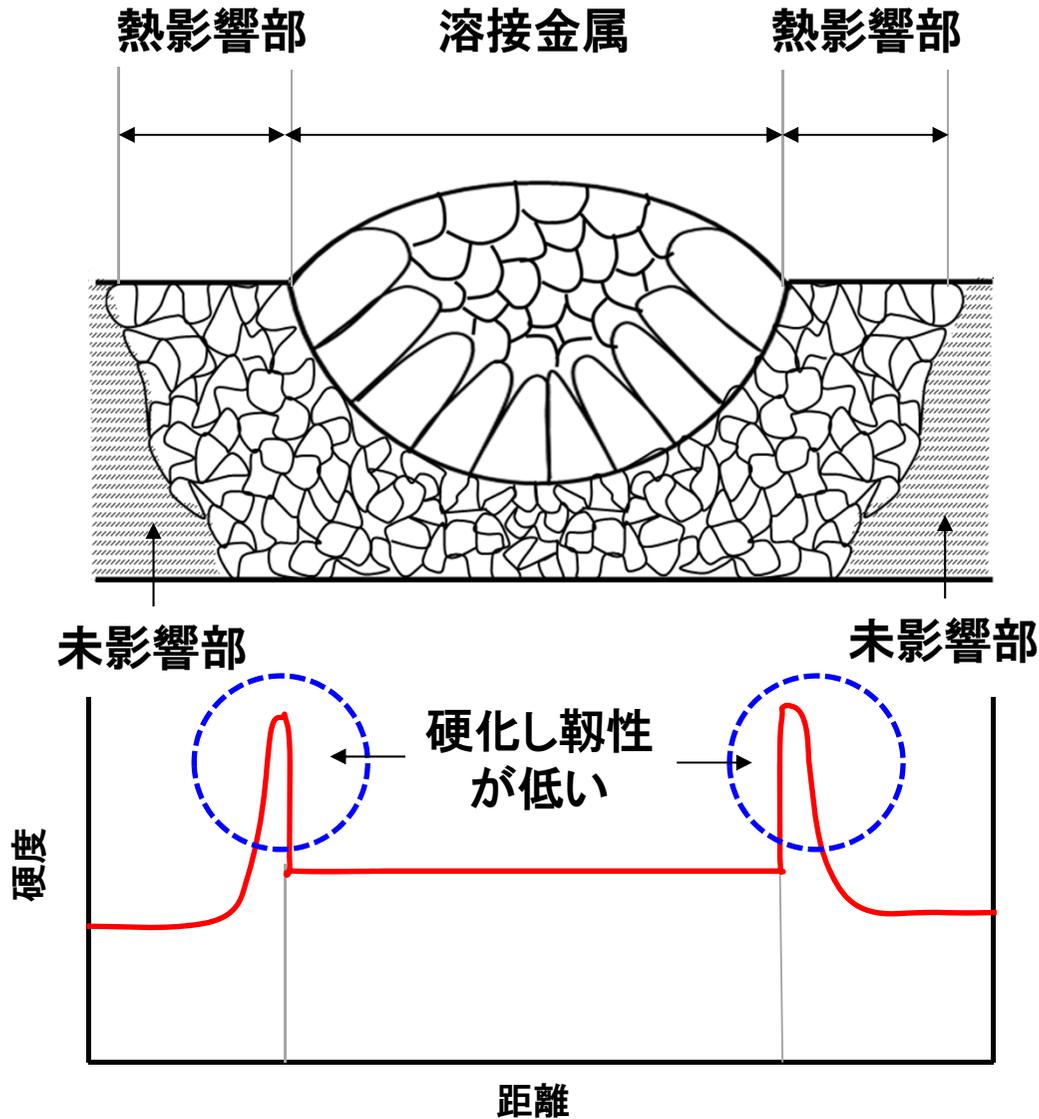
アーク溶接をしたときの各部温度の時間変化

溶接中心から離れるに従い最高到達温度低下し、最高温度到達に時間を要すこと、加熱冷却速度が低くなる。



アーク溶接をしたときのHAZ部の予熱の影響

溶接入熱が大きいほど、予熱温度が高いほど、冷却速度が小さくなる。

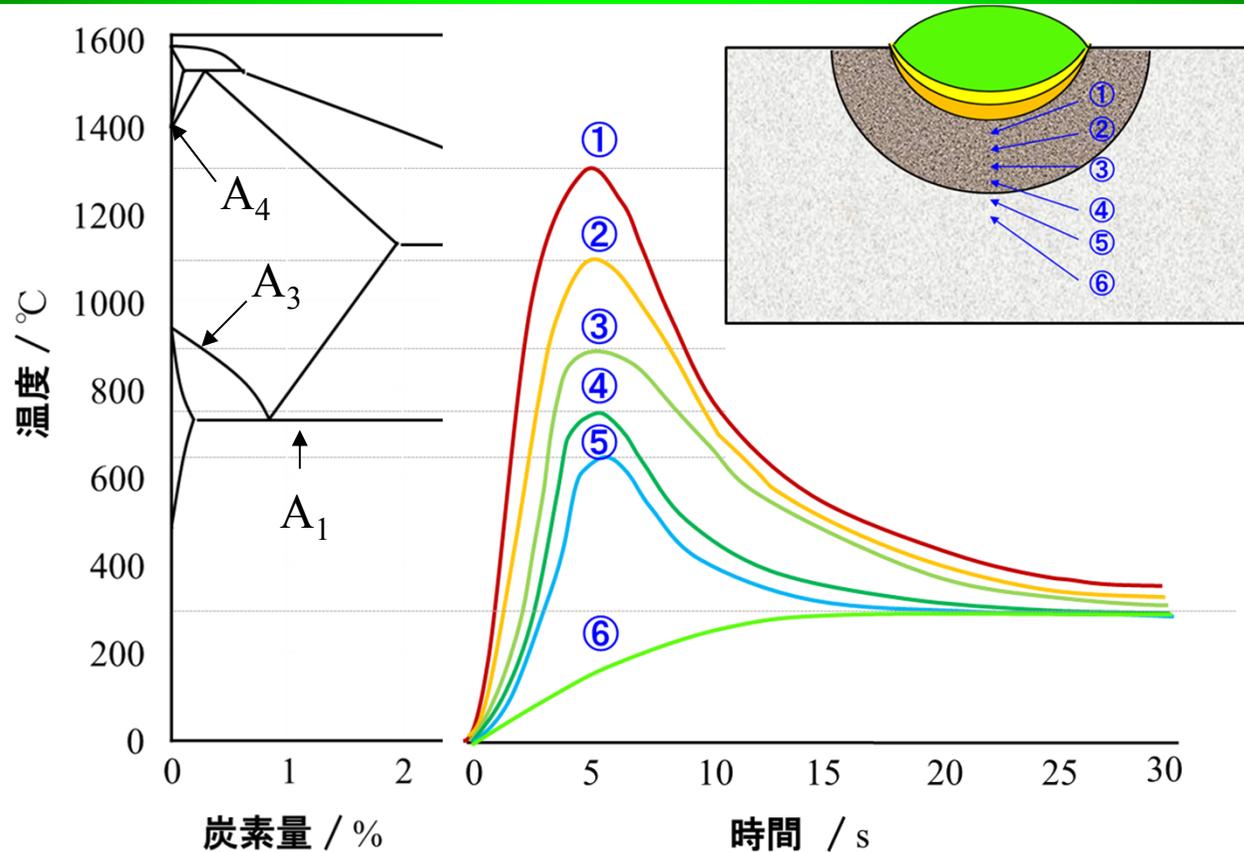


典型的な鋼材の溶接影響部の組織模式図と硬度分布

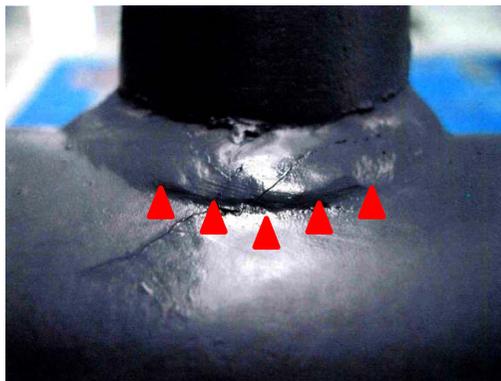
熱影響部(Heat-Affected Zone:HAZ)

溶接などによる熱で組織や機械的性質に変化を生じる部分で、溶接部では母材と溶接金属の中間部分に相当する。一般に、溶接金属に接する熱影響部は硬さが高く、切欠きじん性(衝撃値)が低い。

熱影響部はオーステナイト化温度以上に加熱され、溶接前の組織が壊れ、冷却により生じる組織が性質を決める。溶接金属と熱影響部との溶融境界部は、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、その温度によって組織が変化する。

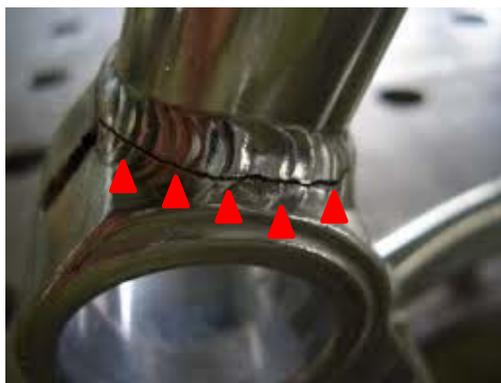


- ① A_3 点以上のため γ 変態を起こし、温度が高いため結晶粒は粗大になる
- ② ①の領域同様 γ 変態を起こすが、温度が低いため結晶粒は混粒
- ③ γ 粒は成長できず微細で冷却条件によりパーライト変態が起こり易い
- ④ A_1 点と A_3 点の間にありパーライトの一部が γ になった後、冷却で球状パーライトになる
- ⑤ 顕著な組織変化はないが靱性の劣化する脆化域に属する

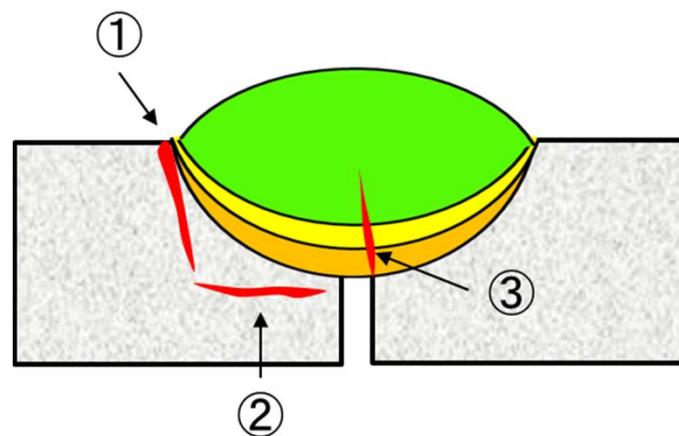


溶接の熱応力や残留応力、変態応力などの応力が、溶接金属の変形能を上回った場合に発生。

(a) 熱間割れ: 溶接金属内部か母材加熱部で発生し、大入熱溶接の場合に現れやすく、破壊は粒界割れを示す。粒界に低融点物質や介在物があると収縮応力を受け割れに至る。



(b) 冷間割れ: 溶接金属内部と母材の溶接変質硬化部に発生し、圧縮応力の高い箇所に水素が濃縮し割れを引き起こす(遅れ破壊)。予熱や拘束の低減で防止が可能。

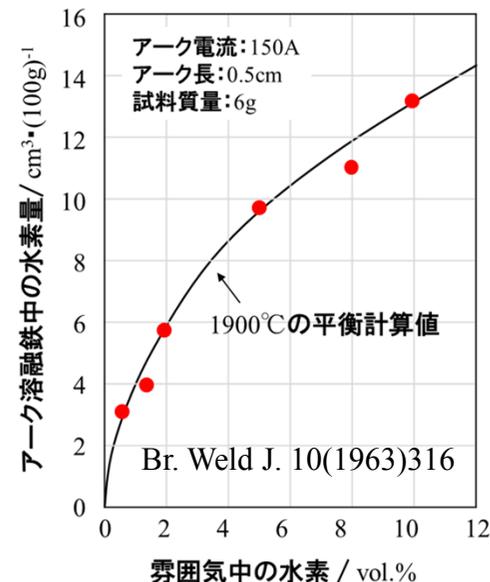


- ① 止端割れ
- ② ビード下割れ
- ③ ルート割れ

冷間割れの形態(硬化組織・応力・水素が三要因)

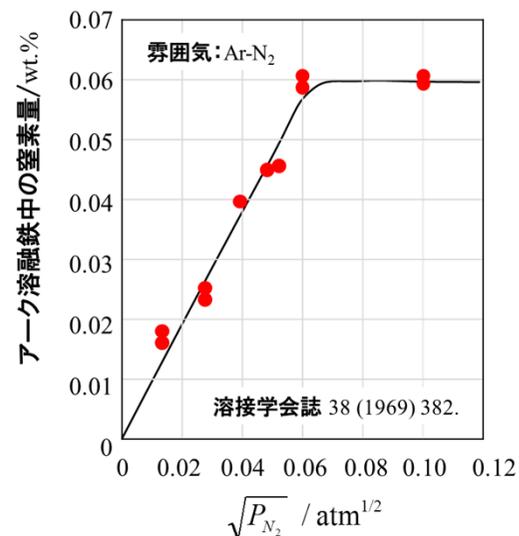
① 水素の挙動

溶接金属に浸透した水素は気孔、銀点、割れ等の原因となる。原子状・イオン状水素(拡散性水素)は冷却後も拡散し低温割れの原因となる。空孔や粒界等の空隙で分子状に存在し拡散が困難な場合(非拡散性水素)も割れを引き起こす。アーク雰囲気中で水素は解離し原子状水素として浸透する(右図)。



② 窒素の挙動

溶接金属に浸透した多量の窒素は、水素と同様に気孔の原因となる。窒素は大気中から供給されるが、電極鋼線中の合金元素を選択することで(Ti, Al, Zr, Si等)、溶融金属中の含有窒素量を低減できる。



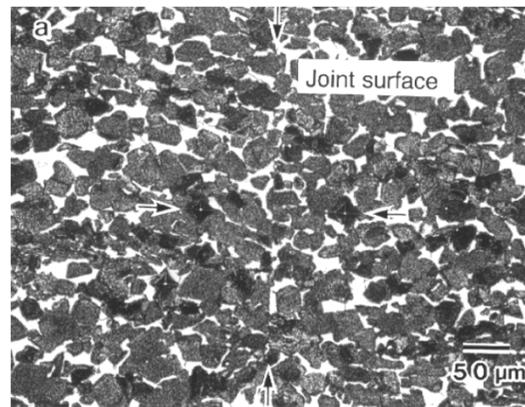
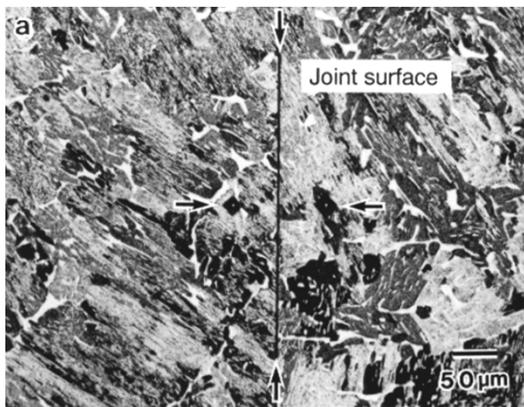
拡散接合とは母材を密着させ、母材の融点以下で塑性変形を生じない程度に加圧し、接合面間に生じる原子拡散を利用して接合する方法。

拡散による溶質流れ J は、溶質濃度 c が低い方に起こり、その濃度勾配に比例する（フックの第一法則）。

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

拡散による濃度 c が時間 t に関して変わる時、濃度 c の時間変化は次式となる。（フックの第二法則）

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$



1000°Cで1h拡散接合したTiAl熱処理材(左)と組織制御材(右)



拡散接合でノズルベーンを一体化したジェットエンジン



拡散接合により製造した航空機部材

御清聴有難うございました