

= 低温割れ (その3)・・・溶接入熱、冷却速度、加熱温度、保持時間、元素の影響 =

前話では、低温割れ (その2) として溶接熱影響部のマイクロ組織について説明をしました。溶接金属にボンド部を挟んで隣接する熱影響部は結晶粒が粗大化したオーステナイト組織を形成し、その後の急冷で過冷オーステナイトとなり、さらに含有炭素量C(%)によって決められる Ms 点を通過してたいへんかたいマルテンサイトに変態することを学んだ。

本話では「熱影響部の硬さ」の説明に入る前に、「溶接入熱」について触れ、引き続きマルテンサイトへの理解を、さらに深めるためにマルテンサイト変態が大いに関係する、「溶接熱影響部」と「焼入れ処理」の双方において、①冷却速度、②加熱温度・保持時間、③元素の影響の諸点から見ることにします。

1) 溶接入熱

溶接アークの熱エネルギーは、近似的には電気的入力を換算した値と考えてよい。通常、溶接電流 I (A) アーク電圧 E (V)、溶接速度 S (cm/min) とし単位溶接長さ当たりのアークから入る熱量 H は次式で与えられる。

$$H = 60 \times I \text{ (A)} \times E \text{ (V)} / S \text{ (cm/min)}$$

$$= 60 \times I \cdot E / S \text{ (J/cm)} = 0.06 \times I \cdot E / S \text{ (Kj/cm)} \quad \dots \dots \dots (1) *1)$$

これらの溶接入熱あるいは溶接入熱量については本溶接技術だよりにおいても何度も触れました。やはり溶接入熱 (量) はアーク溶接 10 大条件の一つであり、溶け込み深さ・ビード幅・溶着量などを決め、溶接歪の発生などには最も大きく影響する因子です。また高温割れの要因にも大きな影響を及ぼすことを説明したばかりです (第 154, 159 & 163 話など参照)。

低温割れとの関係でいえば、溶接入熱(量)が冷却速度 (冷却時間) を決めるため熱影響部の組織、かたさに直接影響を及ぼし、最高硬さを課題とする溶接対象品の場合は必須の管理条件となります。

2) マルテンサイトへの影響要因

(ア) 冷却速度

溶接熱影響部は健全な溶接性を確保するため所定の硬度以上に上げたくないという特性が要求される一方、焼入れ処理では所定の冷却速度より遅くなれば不完全焼入れとなって硬度が得られないという関係にある。また、普通の溶接での熱影響部は冷却曲線から見て、一般に「不完全な焼入れ」に相当する。ただし溶接熱影響部が普通の焼入れと相違するところは、溶接の場合は急速加熱され、場所によって最高加熱温度が相違し、その温度に保持されないでただちに冷却されることである。

溶接部の冷却速度は、溶接入熱、板厚、継手形状、溶接開始前の板の温度などによって著しく変わる。一般に溶接入熱が小さいほど、板厚が大きいほど、予熱温度が低いほど、冷却速度は大きくなる*2)。

溶接熱影響部の組織が溶接条件 (冷却速度) によって変化する状況は、CCT (連続冷却変態曲線) 図で示される。また、適用する鋼の成分に対して冷却速度をどの程度にするかについては、CCTあるいはSH-CCT (再現熱影響部連続冷却変態図) およびTTT (等温変態曲線) を用いるときわめて便利であるとされている*3)。

* TTT 線図(等温変態曲線図)=鋼をオーステナイト状態から急冷して種々の温度に保持したとき、その過冷オーステナイトがその温度において変態する時間的な経過を示した図である。

* CCT 線図(連続冷却変態図)=鋼の熱処理や溶接における種々の条件で、連続的に冷却される過程での変態の挙動を調べるための変態図である。とくに溶接の場合にはこの図は重要な役割を果たす。

* SH-CCT 図 (再現熱影響部連続冷却変態図 (Continuous Cooling Transformation Diagram of Heat-Affected Zone))
 =これは同材の小試験片を 1300°Cまで急速に加熱したのち、いろいろな冷却速度で冷却したときの変態開始および終了の温度と 800°Cからの冷却時間との関係をプロットしたものである。

参考図書*4) より SH-CCT 図の一例を以下に引用し、説明を加えます。

図 168-01 に、HT490 鋼のオーステナイト粒が、最も粗大化する溶融境界近傍熱影響部の例を示す。(図中の朱色などは、筆者が説明のため付したものです。)

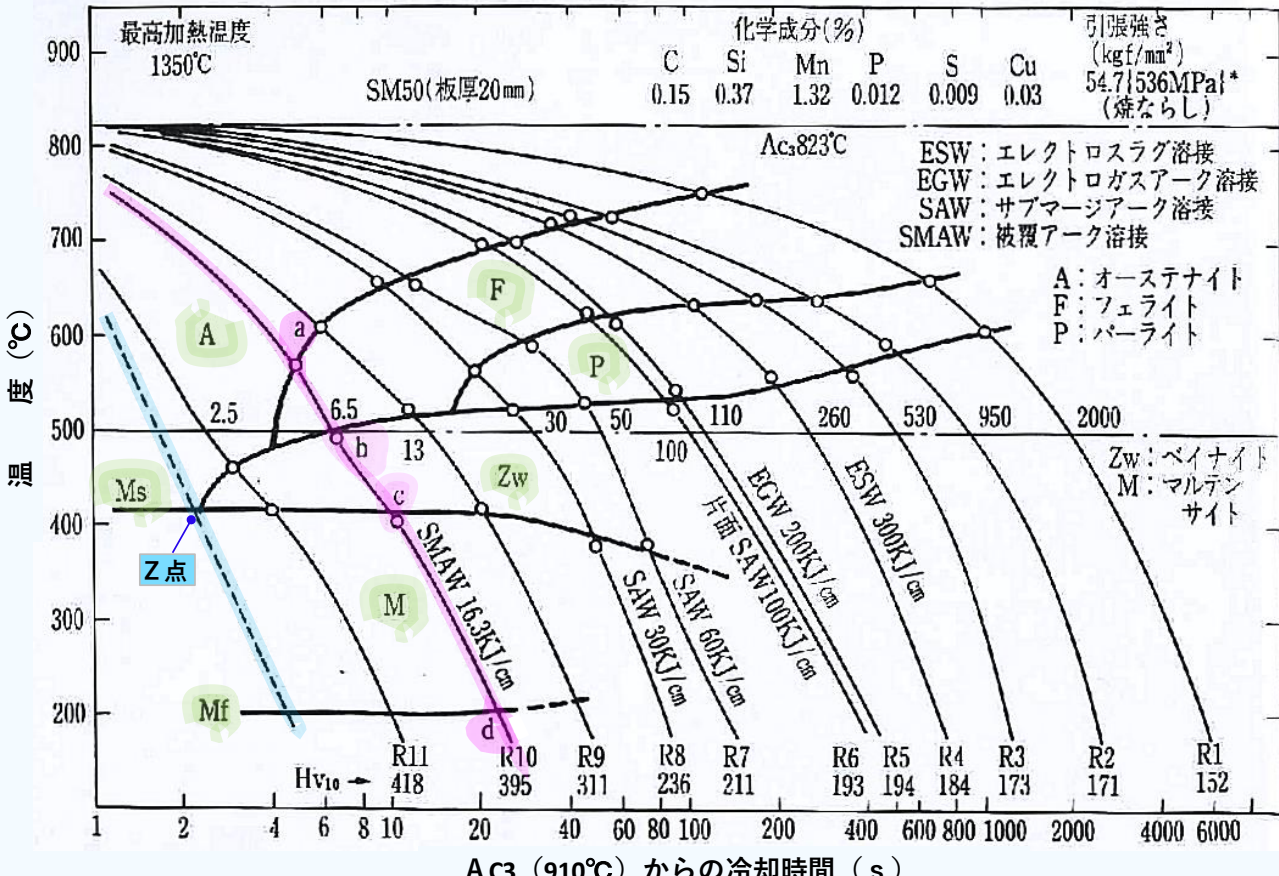


図168-01 HT50(50kgf/mm²){490MPa}*高張力鋼のCCT曲線図(最高加熱温度1350°C)
 { }を付して示してある単位および数値は国際単位系(SI)によるもの

例えば R10 曲線(abcd)は入熱 16.3Kj/cm の被覆アーク溶接の冷却曲線に対応し、温度 a 点 (570°C) まではオーステナイト組織であるが、温度区間 ab (570-500°C) で F (フェライト) が析出し、温度区間 bc

(500-410°C) で中間段階組織 (Zw, ベイナイトともいう) が生じ、温度区間 cd(410-205°C) で M (マルテンサイト) が生じる *4)。

CCT 図では冷却速度を 800°C から 500°C までの冷却時間 (t_{8/5}) で表示する。それは、通常の C-Mn 鋼では、冷却変態がほぼ 800°C で始まり、500°C 付近で完了するからである。

CCT 図で、Z 点を通る冷却曲線は臨界冷却速度と呼ばれていて、Z 点はベイナイト変態の開始を示し、それ以上の冷却速度 (それ以下の冷却時間) では、熱影響部は 100% マルテンサイト組織になる。

炭素当量 (Ceq; 後述) が増加すると、臨界冷却速度が低下して CCT 図の Z 点は右方向に (冷却時間の長時間側に) 移動し、したがって同じ溶接条件 (同じ冷却速度) においてマルテンサイト (M) 変態しやすくなる *5)。

なお同じ鋼種でも、鋼材が大きくなると硬化深度が小さくなり、焼き入れにむらができる現象を呈するが、溶接熱影響部の場合は冷却速度が大きくなるので硬くなりやすい。この現象を「質量効果」と呼び、予め対象溶接品の大きさ、冷却速度に着目しておく必要があります。

(イ) 加熱温度・保持時間

加熱温度が高ければ高いほど、保持時間が長ければ長いほど結晶粒が粗大化して靱性や伸び・絞りが低下しやすいが、炭化物が十分溶け込むので硬度は上昇する。

一般の熱処理用の CCT 図では焼入れ時の最高加熱温度は通常 850~900°C 程度であるが、溶接用 CCT 図での最高加熱温度は約 1,300~1,350°C である。

これらの CCT 図は、最高加熱温度でいちじるしく変化する。一般に加熱温度が高いほど、CCT 図の各組織発生曲線の右側に移動しマルテンサイトが生じやすくなる傾向が強い。すなわち熱影響部の中では、細粒域よりも、粗粒域付近がもっとも硬化が顕著となるのである。

(ウ) 元素の影響

マルテンサイトを造る元素は炭素の他に窒素 N がある。共に侵入型元素と呼ばれる。ただし、鋼の溶接の場合、窒素の適用はブローホールなどの悪影響が生ずるので適用されない。

封じ込めた炭素量 C が多ければ多いほど当然硬さは増すため溶接熱影響部の最高硬さは、鋼中の炭素量 C の影響がもっとも大きい。

しかし、炭素以外の元素の影響も無視できなくて各元素の効果を、炭素当量 (Ceq) として換算し最高硬さを推定する考え方が採用されている。

炭素当量 (Ceq) についてわが国では、次の炭素当量式 (2) が一般に用いられている *6)。

$$Ceq = C + 1/6Mn + 1/24Si + 1/40Ni + 1/5Cr + 1/4Mo + 1/14V (\%) \dots \dots \dots (2)$$

-
- *1), *2) 産報出版, 溶接・接合技術入門, 溶接学会編 p84 より引用
 - *3) 日刊工業新聞社, 溶接冶金学, 松田福久著 p37, p200-203 より抜粋、引用
 - *4) 産報出版, 溶接技術の基礎, 溶接学会編 p73-74 より引用
 - *5) 産報出版, 鉄鋼材料の溶接, 百合岡信孝・大北 茂著 p76-78 より抜粋、引用
 - *6) 産報出版, 溶接技術の基礎, 溶接学会編 p74 より引用

次話では低温割れ (その 4) として「熱影響部のかたさ」について説明します。

以上。