

熱処理知識向上のための基礎講座

神田 輝一*

1. はじめに

熱処理という言葉聞いて何を連想するでしょうか。村の鍛冶屋さん、左党の人ならビール、加熱したり焼いたり、蒸したりする料理、そして工業炉を扱っている人であれば刀の焼入れに代表される鋼の熱処理を思い浮かべるのではないのでしょうか。

本解説は、ビールの熱処理ではなく鋼の熱処理に主眼を置き熱処理知識向上に役立てられればと執筆したものである。

2. 熱処理とは

熱処理を一言で表現すると図1で表すように物を加熱し、その後冷却する一連の熱プロセスのことである。すなわち“赤めて冷やす連続工程が一对となり材料の性質を変化させる処理”のことである。この意味からすれば鋼の熱処理にとどまら

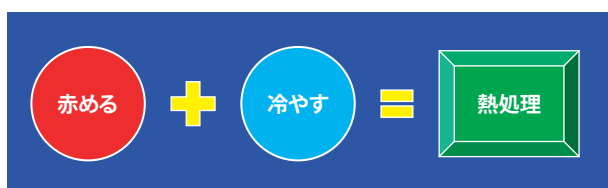


図1 熱処理を一言で表現すると

ず、焼結、焼成及びろう付等の熱加工も熱処理の範疇に入る。また、世間の耳目を集めている炭素繊維も熱処理により製造されているのである。そして熱処理を実践する設備が熱処理炉である。

その他、加熱・冷却のプロセス(熱処理)を必要とするモノづくり産業は数知れない。熱処理とはモノ(材料)が持っている特性を引き出す工程なのである。言葉を換えれば、熱処理によりモノに魂が入るのである。

以前、ある鋳物工場を見学したとき熱処理炉の前に大きな垂れ幕がありそこに“熱処理工程は鋳物に魂を入れる大切な工程です。”と書いてあり深い感銘を覚えた。

ここで肝心なことは、熱処理の種類やモノによって加熱温度を何度にし、どの程度保持するか原則があり、冷却の方法にも熱処理の種類やモノにより冷却方法の原理原則があるということである。

ところが、その組み合わせには千差万別ありこれを全て覚えておくことは不可能である。このため熱処理の加熱・冷却方法の原理原則を理解しておくことが重要である。

* 関東冶金工業株式会社 取締役 技術開発室 室長(工博) K. Kanda

さて、熱処理作業を行うための三大要素は図2に示したように、温度、時間そして雰囲気である。筆者はこれを“ふじお君”と名付けた。すなわち雰囲気の“ふ”、時間の“じ”そして温度の“お”である。熱処理を勉強する人たち、そして熱処理設備を製造する炉メーカーの人たちはこの三大要素を習得することにより熱処理の本質を知ることとなる。



図2 熱処理の三大要素はふじお

筆者がペンステイト（ペンシルベニア州立大学）で知り合った友人の一人にTAT社というアメリカの工業炉メーカーを営んでいる友人がいる。この社長にTATとはどのような意味かと最初に会った時に質問したことがある。そのとき彼は得意げにT (Time) - A (Atmosphere) - T (Temperature) の頭文字を取り社名としたと答えた。この時間—雰囲気—温度が熱処理設備メーカーにとって最も重要な要素であり著者が以前から思っていたことを社名にしたということで、意気投合し今でもお付き合いをしている。

工業炉を扱う日本の炉メーカーが熱処理設備を納入するとき、ユーザーにこの三要素を保証し試運転で実践し検収となるのが一般的である。

ここで温度は温度計で、時間は時計で具体的に測ることができるが、雰囲気については目で見ることができず抽象的であり、現在の炉内の雰囲気の状態を具体的な数値で表すことが難しい。このため雰囲気を扱うにあたって多くの経験と知識を必要とし様々な問題が起きる要素でもある。雰囲気については文献1)～3)を参照のこと。

3. 鋼の熱処理概要（熱処理を実践する時に必要な最低限な知識と原理原則）

3.1 変態とは

鉄は奇跡の金属と呼ばれている。その理由の一つとして、鉄は他の金属にはない風変わりな変態をする金属であるからである。変態とは、結晶構造がある温度でガラリと変わることをいう。

図3は鉄を室温から加熱した時の伸びと温度の関係を示した模式図である。

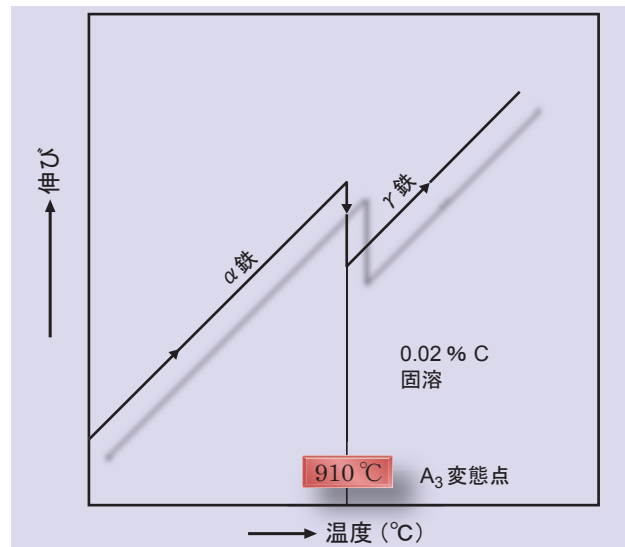


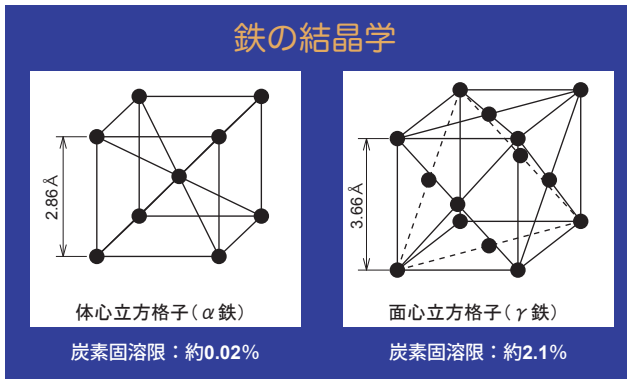
図3 鉄の加熱曲線

金属は程度の差はあるが、加熱すると膨張し伸びていく。鉄も加熱をすると伸びていくが、910°Cに達したと同時に今度は加熱しているにもかかわらず収縮に転じる。そしてしばらくすると何事もなかったように再度伸び始める。室温から910°Cまでは加熱とともに徐々に膨張し伸びていくので変化という。ところが910°Cで急激に収縮するのでこれは変化といわず変態という。余談だが人間にもスランプという変態がある。

この変態を起こす温度を変態点と呼ぶ。鉄の場合、室温から910°Cまでの結晶構造は図4(a)に示すような体心立方格子(B.C.C)であり、サイコロで例えるとサイコロの角(八角)とサイコロの中心の位置に鉄原子が存在する構造である。この結晶構造では炭素は最大でも0.02%しか固溶できない。そして910°C以上の温度での結晶構造は図4(b)に示すような面心立方格子(F.C.C)といいサイコロで例えるとサイコロの角(八角)とサイコロの目の面(六面)の位置に鉄原子が存在する構造である。この構造は炭素を最大2.1%も固

溶することができる。

以上のように変態があり変態点で結晶構造が変化することが奇跡の金属の由縁であり、この現象があるから鉄に炭素を添加した鋼は、加熱と冷却のルールを守ることにより自由に硬さを変えることができ、機械的性質も縦横無尽に変化させることができるのである。ちなみに人間もスランプを乗り越えて成長する。



(a) 体心立方格子 (B. C. C) (b) 面心立方格子 (F. C. C)

図4 鉄の結晶学

3.2 なぜ鋼は焼きが入り硬くなるのか (鋼の結晶学)

前項で述べたように鋼には二種類の結晶構造がありそれぞれ炭素の固溶限が異なる。

例えば S50C (0.5% C) を室温から加熱していくと変態点で結晶構造が面心立方格子 (F. C. C) に変態し 0.5% の炭素 (C) を完全に固溶することができる。この状態で徐々に温度を下げていくと図5の模式図のように変態点で体心立方格子 (B. C. C) に変態し炭素を固溶できず Fe₃C (セメントイト) として吐き出す。ところが、急冷すると、結晶構造は無拡散反応のため変態点で F. C. C に変わるが図6の模式図に示すように内部に固溶していた炭素 (C) は拡散反応であるため吐き出すことができず、炭素を 0.5% 固溶したままを F. C. C に変化する。本来であれば 0.02% しか固溶できない炭素が 0.5% も固溶しており歪が溜まり硬くなるのである。

すなわち鋼は熱処理効果が顕著である金属なのである。その他多くの金属にも変態は存在するが、低温側では F. C. C であり高温になると B. C. C に変態するのが一般的な金属の変態であり、鋼とは全く逆の変態をするため炭素の固溶限が逆であり焼入れ等の熱処理効果はほとんどない。

例えば純銅 (Cu) は、変態がないので焼入れ効果がなく、硬くするためには叩いて加工硬化現象で硬くするのである。

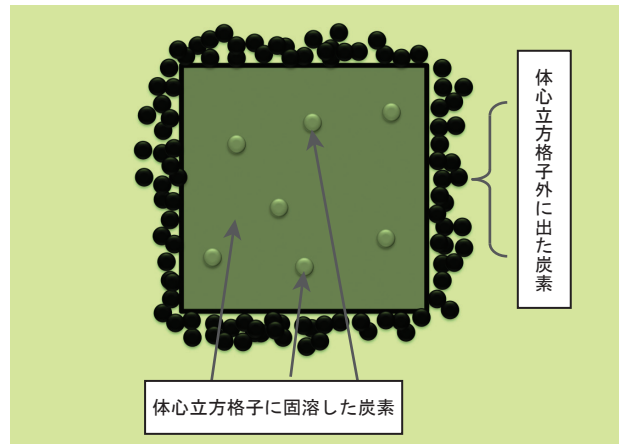


図5 S50C をオーステナイト状態から徐冷された鋼の炭素分布模式図

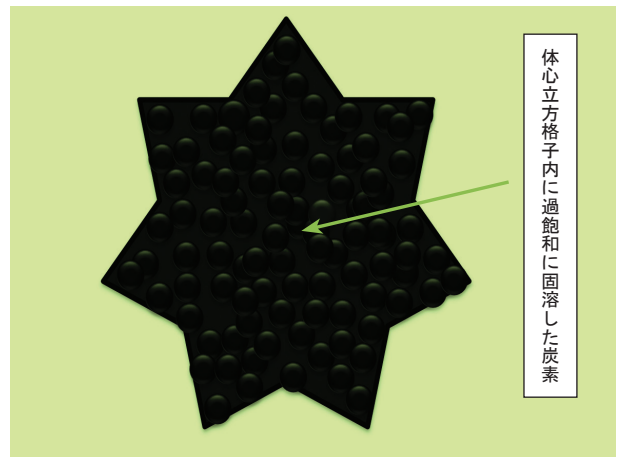


図6 S50C をオーステナイト状態から急冷された鋼の炭素分布模式図

3.3 変態を知り熱処理の原理を理解する

鋼に現れる変態点には図7のように5種類の変態点が存在する。

変態を知り熱処理の原理を知る

- 鋼に現れる変態点

A₀ A₁ A₂ A₃ A₄

210 °C 723 °C 770 °C 910 °C 1400 °C

- 熱処理に重要な変態点

重要なのは A₁ 及び A₃

図7 鋼に現れる5種類の変態点

A₀ (210 °C) :

セメンタイト (Fe₃C) の磁気変態であり、炭素量には依存せず約 210 °C である。この温度以下では、セメンタイトは強磁性体であるが、それ以上の温度では常磁性体となる。

A₁ (727 °C) :

鋼の共析変態を A₁ といい、その温度は炭素量に関係なく 727 °C である。

この変態での組織変化は下記のとおりである。



A₂ (770 °C) :

鉄 (Fe) の磁気変態をいう。鉄は A₂ 変態点以下で強磁性体でありそれ以上では常磁性体となる。

A₃ (910 °C) :

鉄が奇跡の金属といわれる由縁はまさにこの変態があるからである。すなわち A₃ 点以下では体心立方格子 (B. C. C) であり α 鉄といい、それ以上 1400 °C までは面心立方格子 (F. C. C) であり γ 鉄となる。

A₄ (1400 °C) :

鋼の熱処理にはほとんど利用されない変態で、下記のような同素変態である。



以上のように鋼には 5 種類の変態があるが、鋼の熱処理に重要な変態点は A₁ と A₃ の二つである。なお、加熱時の変態を Ac, 冷却時の変態を Ar と表す。

筆者は、学生のと看 Ac の c は canetu (カネツ), r は reikyaku (レイキヤク) とおぼえよ! と教わったことを記憶している。

3.4 鋼の状態図に現れる変態

図 8 は鉄と炭素の状態図である。ここで鋼の熱処理において重要な区域は薄墨を塗った部分で、これを拡大したものが図 9 である。

図 9 について以下説明する。縦軸が温度、横軸

が炭素 (C) 量で右に行く程含有量が増加する。これを読むと温度と炭素量を決めれば一義的に安定相 (組織) が決まり読み取れる。

G 点は純鉄の A₃ 変態点で 910 °C である。これに炭素が入ると A₃ 線に沿って変態点は低下してゆき S 点で最低温度を取る、その温度は 727 °C で P 点を A₁ 変態点という。また、P-S-K 線を A₁ 線という。

S 点で最低温度になり A₃ 線は A₁ 線と交わりそれ以上炭素量が増加すると再び A₃ 変態点は上昇し E 点に達する。この S 点-E 点を結んだ線を Acm 線という。

S 点は 0.8 % 炭素であり、S 点を共析点といい 0.8 % 炭素を含む鋼を共析鋼という。

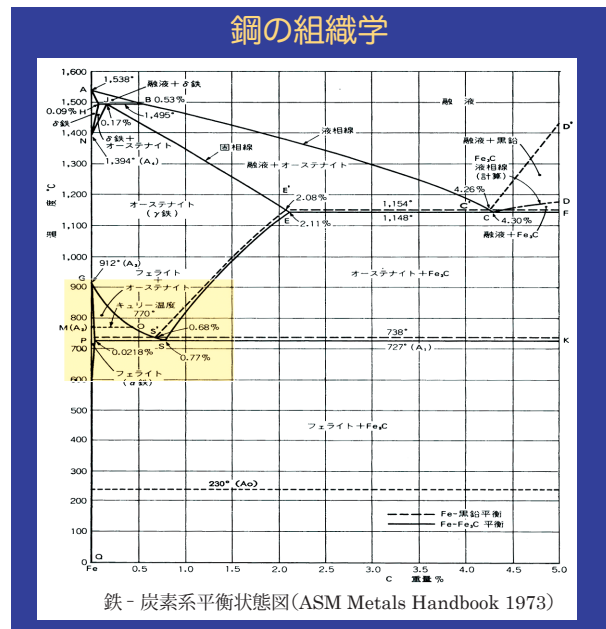


図 8 鉄-炭素系平衡状態図

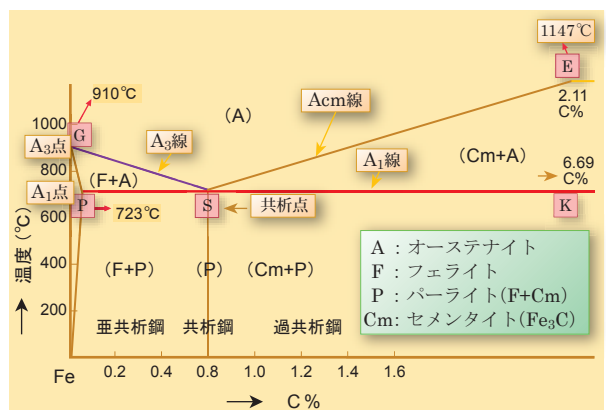


図 9 熱処理において鉄-炭素系平衡状態図で重要な部分拡大図

0.8%炭素以下の鋼は亜共析鋼と呼びクランクシャフト等に代表される機械構造用鋼に用いられる。

0.8%炭素以上の鋼は過共析鋼と呼ばれ主にダイスや切削工具等の構造用鋼に用いられる。

共析鋼の焼なまし組織はパーライト(P)とよばれ、亜共析鋼での組織はフェライト+パーライト(F+P)の二層混合組織となる。また、過共析鋼のそれは、セメンタイト+パーライト(Cm+P)の二層混合組織となる。

3.5 亜共析鋼の組織変化模式図

“亜”とは、足りないという意味があり、“亜共析鋼”とは、共析鋼の炭素含有量0.8%よりも低い炭素を含有する鋼を言い、主に機械構造用鋼に使用される。これにニッケル(Ni)やクロム(Cr)など合金元素を添加したものが、機械構造用合金鋼である。

図10に亜共析鋼の組織変化模式図を示した。

ここでは、S40C(JIS)をA₃変態点以上に加熱しオーステナイト1相としたものを徐々に冷却すると、A₃点以下の温度で徐々に炭素を含まないα鉄のフェライトを析出し、そのためマトリックス(地)のオーステナイト中の炭素濃度が高くなり、A₁変態点で炭素濃度が共析の0.8%に達し一挙にパーライトになり最終的には、フェライトとパーライトになることを示している。

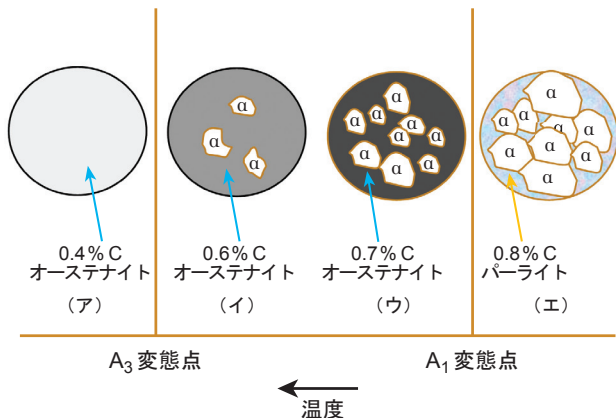


図10 亜共析鋼の組織変化模式図

3.6 過共析鋼の組織変化模式図

“過”とは、多いという意味があり、“過共析鋼”とは、共析鋼の炭素含有量0.8%よりも高い炭素を含有する鋼を言い、主に工具鋼に使用される。これにニッケル(Ni)、クロム(Cr)、モリブデン

(Mo)、タングステン(W)などの合金元素を添加したものが、合金工具鋼である。

図11に過共析鋼の組織変化模式図を示した。

ここでは、SK120(旧JISではSK2)をA₃変態点以上に加熱しオーステナイト1相としたものを徐々に冷却すると、A₃変態点以下の温度で炭素を6.7%含むセメンタイトを析出し、そのためマトリックス(地)のオーステナイト中の炭素濃度が徐々に低くなり、A₁変態点で炭素濃度が共析の0.8%に達し一挙にパーライトになり最終的には、セメンタイトとパーライトの二相になることを示している。

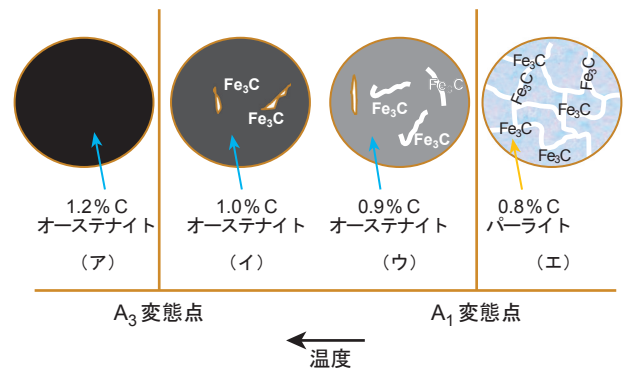


図11 過共析鋼の組織変化模式図

3.7 共析鋼の組織変化模式図

共析鋼とは炭素を約0.8%含む鋼をいう。この炭素量の鋼のA₃変態点は図9の状態図からもわかるが、A₃変態点は727℃まで下がりA₁変態点と交差しA₃とA₁変態点と同じ温度になる。すなわち図12に示すようにこの鋼をA₃変態点(A₁変態点)以上に加熱しオーステナイト一相とした後徐々に冷却すると723℃で100%パーライトになることを表している。

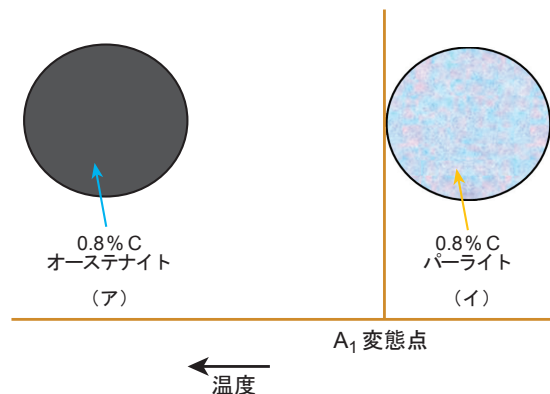


図12 共析鋼の組織変化模式図

3.8 加熱温度と熱処理の種類

鋼の熱処理には、加熱する原則があり、図13のようにA₃の変態点以上に加熱する熱処理は、完全焼なまし、焼ならし、焼入れなどがある。これに対してA₃の変態点以下で加熱する熱処理の代表は、応力除去焼なまし及び焼戻しである。

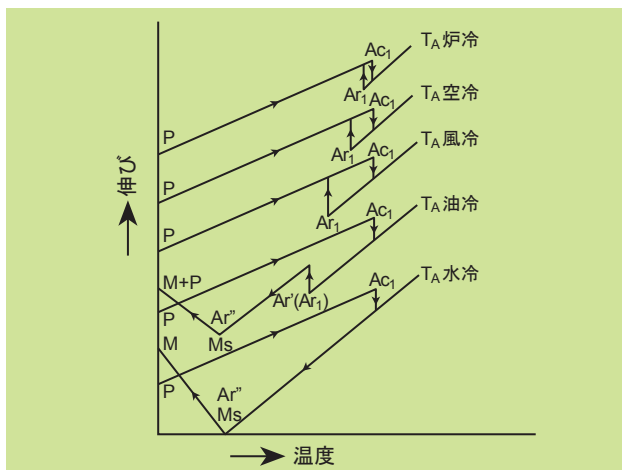


図13 共析鋼の冷却の違いによる温度と伸びの関係模式図

3.9 冷却速度と変態点

図12は共析鋼を加熱しゆっくり冷却した時の伸びと温度との関係を示した図である。ところが実際の熱処理作業では、一般の抵抗加熱や燃焼加熱において加熱速度を極端に早くすることはできなが、その後の冷却速度は、炉冷、空冷、焼入れ等により千差万別自由に変化させることができる。

実はその冷却速度により冷却時の変態点(Ar)の温度が変化し、それにつれて組織も変化することになる。これが熱処理における冷却の極意である。

以上のことから完璧な熱処理作業を100%とすると、そのうちの加熱処理技術が30%、冷却処理技術が70%ではないかと考える。

図13に共析鋼の冷却の違いによる温度と伸びの関係の模式図を示した。共析鋼を選んだ理由は、A₃変態点とA₁変態点とが同じ温度であり説明が簡素化できるからである。

この模式図でわかることは、共析鋼をAc₁変態点以上のT_Aに加熱しオーステナイト一相とした後、冷却速度を、炉冷、空冷、風冷、油冷と変化させるとAr₁変態点が徐々に低温側にシフトし、油冷においては、Ar₁がなくなり、Ar'とAr''の二つに分かれる。

Ar'とAr''が現れる最小の冷却速度を下部臨界冷却速度という。ここで現れるAr'は、Ar₁と同じパーライト変態であり、Ar''は焼入れ組織であるマルテンサイトが出現するマルテンサイト変態でありMs点といわれる。

水冷においてはAr''のみの変態となる。ここで重要なことはAr''変態は低温側で大きな膨張を起こすということであり焼割れの原因ともなる。Ar''変態のみを起こさせるに必要な冷却速度を上部臨界冷却速度という。

以上述べたように、鋼の熱処理における組織変化は、変態点を徐冷するか急冷するかで様々に変化するので鋼の熱処理で最も重要なことは加熱よりも冷却である言っても過言ではない。

3.10 冷却方法と変態点

最初に述べたが、熱処理とは加熱し、冷却することだと述べた。すなわち熱処理において原理原則に基づく加熱温度設定の決まりごと(ルール)があり、そして冷却方法にも当然原理原則からの決まりごと(ルール)がある。ここでは鋼の熱処理における冷却の要点を述べる。

図14は鋼をオーステナイト域に加熱した後、冷却する方法を、一般熱処理である焼入れ、焼ならし及び焼なましについて解説した図である。

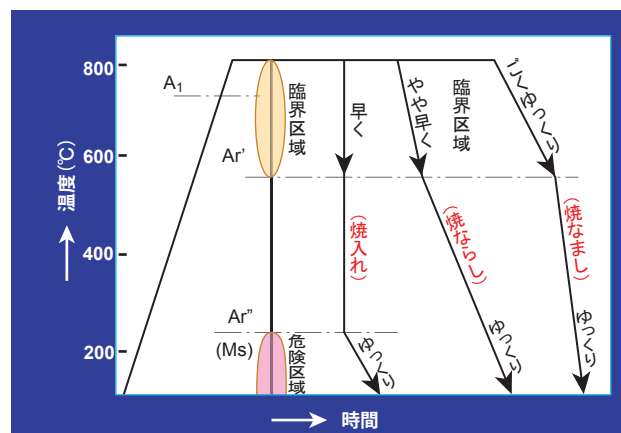


図14 熱処理の種類と冷却方法

ここに現れる変態点はAc₃, Ar'及びAr''点であり冷却においてはこの三変態が重要になる。

オーステナイト域からAr'点までを臨界区域と呼び、この間を早く冷やすか、ゆっくり冷やすかで、熱処理組織が決定するすなわちAr''点以降の冷却速度では基本的な熱処理組織は変化しないということを示している。

すなわち臨界区域を ① 早く冷やすのが焼入れ、② やや早く冷やすのが焼ならし、そして ③ ごくゆっくり冷却する熱処理を焼なましと言う。

ここで注意が必要なのは Ar' 点を早く冷却する焼入れにおいては、Ar' 変態点の低温側で大きな膨張を起こすので、Ar' 変態点以下の危険区域をゆっくり冷却させることが焼入れ作業の勘所である。

以上の内容は、著者の仲人であり熱処理の恩師である故大和久重雄先生に実践も含め教えを受けた内容である。そこで大和久先生の著書を参考文献として載せさせていただきました。^{4) ~ 9)}

4. 終わりに

以上、鋼の熱処理の基礎の基礎について述べた。この中で、A₁ 変態点とか A₃ 変態点そして共析、亜共析、過共析など専門用語が出てきたが、これらは符牒でありこの言葉は専門用語辞典^{10) ~ 11)}などを読んで自分のものにしておいていただきたい。

また、パーライトとかオーステナイトとかマルテンサイトとか鋼の組織名が出てきたが、これらの金属組織については次報以後で説明する。

5. 参考文献

- 1) 神田輝一：雰囲気熱処理の基礎と応用；日刊工業新聞社（2014. 5）
- 2) 神田輝一：雰囲気炉のための炉気再思三考（前編）；工業加熱，（一社）日本工業炉協会，Vol. 52. No2, (2015. 3)
- 3) 神田輝一：雰囲気炉のための炉気再思三考（後編）；工業加熱，（一社）日本工業炉協会，Vol. 52. No3, (2015. 5)
- 4) 大和久重雄：JIS による熱処理加工；日刊工業新聞社（1971）
- 5) 大和久重雄：鋼・熱処理アラカルト；日刊工業新聞社（1978）
- 6) 大和久重雄：JIS 鉄鋼材料入門；大河出版（1978）
- 7) 大和久重雄：熱処理 10 つのポイント；大河出版（1986）
- 8) 大和久重雄：金型の熱処理ノート；日刊工業新聞社（1991）
- 9) 大和久重雄：熱処理ノート；日刊工業新聞社（2008）
- 10) 大和久重雄：金属熱処理用辞典；日刊工業新聞社（1985）
- 11) （一社）日本熱処理技術協会（編）：熱処理用語辞典；日刊工業新聞社（2002）

（その他）図 2 のイラストは渡邊操子さん提供