



熱処理知識向上のための基礎講座 (第二報)

神田 輝一*

1. はじめに

前報では熱処理を実践する際に必要な最低限の知識と熱処理の原理原則について述べた。¹⁾ その中で熱処理とは“赤めて冷やす連続工程が一對となり被処理物の性質を変化させる処理”であることを解説した。

ところが、やみくもに被処理物を加熱し冷却しても熱処理技術とは言い難い。なぜなら熱処理には加熱(赤める)ためのルールがあり冷却する(冷やす)ためのルールがあるからである。今回の二報では一般熱処理の焼ならしと焼なましについて、加熱・冷却方法のルールと熱処理設備及び光輝処理の雰囲気を含め解説する。

2. 一般熱処理とは

鋼の熱処理を大別すると、図 2.1 のように一般熱処理と表面熱処理の二種類に分類できる。

一般熱処理の種類には、焼なまし、焼ならし、及び焼入れ焼戻し等がありバルク(全体)熱処理とも呼ばれる。一方、表面熱処理の種類には、浸炭、浸炭窒化、窒化处理及び高周波熱処理そして炎熱処理があり、鋼の表面のみ組織を変化(改質)

させる処理のことでサーフェース(表面)熱処理と呼ばれることもある。

また、国家資格である金属熱処理技能士試験では次の三種類に分かれている。すなわち、① 一般熱処理作業、② 浸炭熱処理作業、浸炭窒化熱処理作業、窒化熱処理作業、③ 高周波熱処理作業、炎熱処理作業の各分野に分かれ要素試験及びペーパー試験が行われている。この中で②及び③が表面改質熱処理である。どの種類の試験に合格しても金属熱処理技能士の資格が与えられる。

以下一般(バルク)熱処理について解説する。

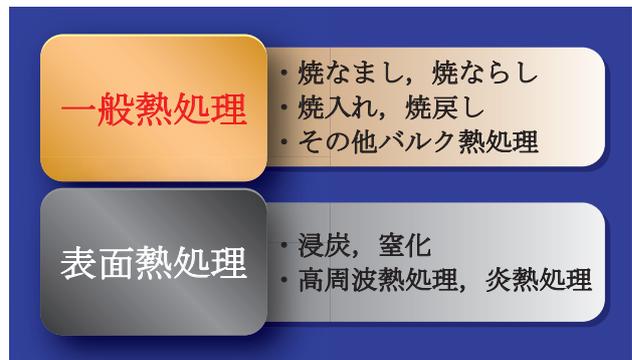


図 2.1 熱処理の種類

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

3. 焼ならし

私が学生の頃は、焼ならしを、焼準(しょうじゅん)と呼んでいた。今でもこの言葉を使う人がいるが、JIS用語では“焼ならし”と呼ばれる。(“焼きならし”ではない)

焼ならしとは、鋼を標準状態(ノーマル)にする熱処理であり前加工の影響を取消し、荒れた結晶粒を微細化し機械的特性を向上させる熱処理である。例えば、熱間鍛造や熱間圧延において高温で塑性加工された鋼は、過熱異常組織や粗大化及び不均一結晶粒を生じている。これらを熱処理により、本来の組織にする作業が焼ならしである。焼ならしにより鋼が本来持っている標準特性を引き出すことになる。

光輝焼ならしはこの熱処理を雰囲気中で行い表面の酸化、脱炭及び浸炭等の変質層のない被処理品を得ることを目的とした熱処理方法である。写真2.2は熱間鍛造品のS45Cの組織写真であり、1000℃以上の熱間加工で結晶粒が粗大化し荒れている。写真2.3はこの製品を860℃にて、焼な

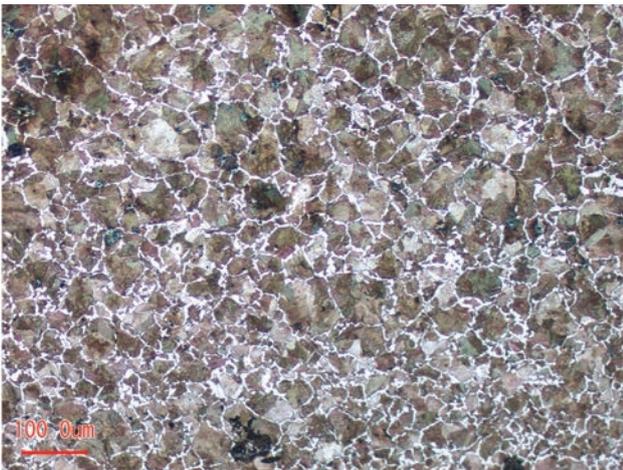


写真 2.2 S45C 熱間鍛造組織



写真 2.3 S45C 焼ならし組織

らし処理した後の顕微鏡写真であり、結晶粒が焼ならしの熱処理により細くなることがわかる。

焼ならしは、日常生活にたとえるならば、写真2.4のように荒れたグラウンドを均一にならして標準な状態にもどす(ならず)作業に類似する。



写真 2.4 焼ならし作業のイメージ

焼ならし温度は、亜共析鋼では $A_3 + 約 50℃$ で後述する焼なましと同じであるが、過共析鋼では、 $A_{cm} + 約 50℃$ で熱処理する。焼ならしの温度範囲は、図2.5の青太線で示す。

一般的なメッシュベルト式光輝焼ならし炉と温度線図を図2.6に示す。ここで炉の構成としては、入口側から、炉内搬送用駆動装置、大気と炉内雰囲気置換する前室、発熱型変成ガスを発生させるバーナを備えた変成室兼予熱炉そして加熱

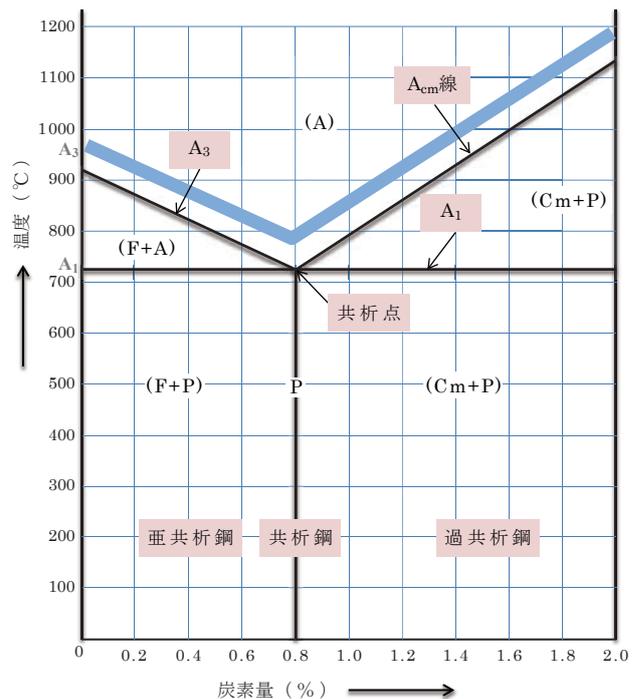


図 2.5 焼ならし温度範囲

炉及び冷却室からなっている。被処理品は前室から後室までのあいだ雰囲気ガスに曝されることになる。

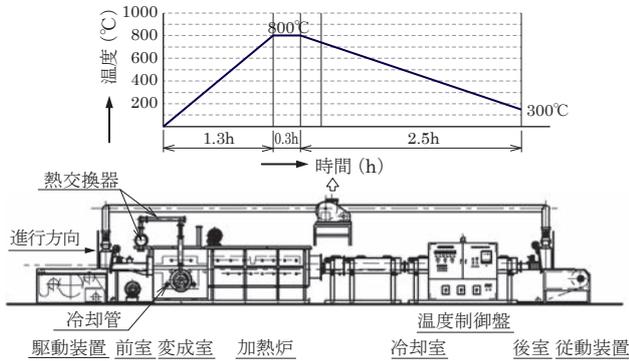


図 2.6 メッシュベルト式焼ならし炉と温度線図

冷却室は水冷ジャケットの二重構造になっておりこの水冷帯で被処理品は冷却されることになる。冷却速度は、水冷ジャケットの水温及びメッシュベルト速度により決定される。場合により、水冷ジャケットとともに水冷の熱交換器を内蔵させ、より早い冷却速度を得る工夫をする場合もある。このように焼ならし作業は加熱よりも冷却が重要なポイントとなる。

冷却室を保有する2室式バッチ式の焼ならし炉では冷却室にファンを設けそのファンの回転数を変化させ冷却速度をコントロールすることを行う。この場合ファンの周囲に冷却コイルがあると効果的である。

焼ならし作業において難しい点は加熱よりも冷却のコントロールであり、被処理品が小さい場合には同じ放冷でも大物の冷却速度に比較して早くなる。つまり部品の大きさにより冷却速度が変化するので注意が必要である。

さらに大気雰囲気では問題にならないが、雰囲気熱処理の光輝焼ならしで注意を要するのは、炉からの取出し温度がある。炭素鋼及び合金鋼においては、雰囲気ガス中から空気に暴露する取出し温度を約 150℃ 以下にしないと、雰囲気中で冷却された被熱処理品が大気中の酸素と反応し変色してしまい光輝な表面が得られないという弊害が出てくる。

取出し温度と鋼の酸化色との関係は、おおよそ

- 200℃ 前後；薄い黄色
- 300℃ 前後；黄色～紫色
- 400℃ 以上；赤色～灰色

である。

取出し温度による鋼の酸化色は、着色温度の目安となる。このとき曝される時間は約 2 分前後である。このとき注意を要する点はその温度に曝される時間が長くなると上述した温度より高温側にずれてくる。保持される時間によっても変化するので雰囲気炉からの取出し温度による着色と焼き戻し時の長い保持時間とでは着色する色が相違するので注意が必要である。

また、ステンレス鋼のように緻密な酸化被膜を形成するクロムを含む鋼では取出し時の着色温度は以下になるので取出し温度は 250℃ 以下にするのが望ましい。

- 300℃ 前後；薄い黄色
- 400℃ 前後；黄色
- 500℃ 前後；黄色～赤色
- 600℃ 前後；赤色～赤紫色
- 700℃ 以上；青色～灰色

であり、以上はあくまでも目安である。取出し温度を判定するには、経験を踏むことが大事であり、できる限り取出し時の製品の温度を携帯表面温度計などで計測することを勧める。最近では非接触で製品の表面温度が測れる赤外線携帯表面温度計も多用されている。

さらに光輝焼ならし作業で注意を要する点に雰囲気ガス成分によって加熱速度及び冷却速度が異なる点である。すなわち熱伝導率及び熱伝達率の大きい水素を含む雰囲気では、水素濃度が高くなるほど冷却速度が速くなる。逆に窒素ガスのように熱伝導率及び熱伝達率が小さいガスでは冷却速度は遅くなる。この現象はあまり知られていないが雰囲気熱処理においては重要なことである。

焼ならしの方法には、冷却方法の違いにより以下の三種類に分けられる。これらの熱処理作業線図を図 2.7 の (a), (b), (c) に示す。

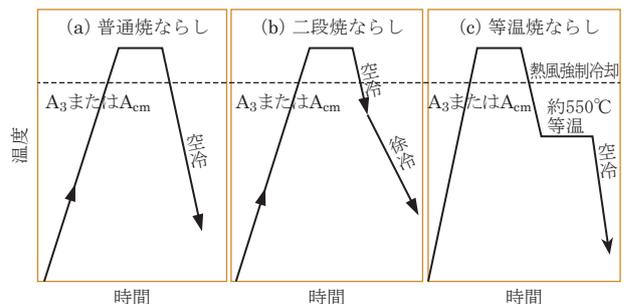


図 2.7 焼ならしの種類

5. 焼ならしの種類

5.1 普通焼ならし (a)

一般に多く用いられている焼ならし方法で、所定の温度から常温まで放冷または空冷する方法である。冷却速度は、各鋼種の連続冷却変態図から目的とする硬度になるような冷却速度にする。普通焼ならしにより鋼は結晶粒が微細になり機械的性質を向上させることができる。反面、合金鋼のように放冷の比較的遅い冷却速度であってもベイナイトなどの硬い組織が一部析出し硬くなってしまふ場合がある。この時は A_{C1} 以下に再加熱し、焼戻しをおこない硬さを調整する。この焼ならし・焼戻し処理をノルマテンパー（ノルテン）と呼ぶこともある。

5.2 二段焼ならし (b)

フェライト結晶粒が微細になる A_{r} 変態点までを目的とする冷却速度で、それ以下を徐冷する方法で主に変形をきらう大物製品に適用される。

5.3 等温焼ならし (c)

サイクルアニーリングともいい、S曲線を利用した熱処理処理方法である。すなわちオーステナイト状態に加熱した後、 A_1 変態直下の約 550°C まで急冷し、その温度保持することで製品のフェライト+パーライト析出を表面と内部の差がなく同時に起こさせ製品全体の組織を均一化できる。この表面・内部の組織の均一化を図り被切削性を向上できる焼きならし方法である。主に自動車部品の鍛造品、例えばクランクシャフト等に適用されている。

図2.8は、メッシュベルト連続炉を例に、この焼きならし温度線図を示した。等温焼きならし炉のポイントはオーステナイト域から 550°C までをいかに早く冷却させるかであり、急冷室の構造が重要ポイントとなる。

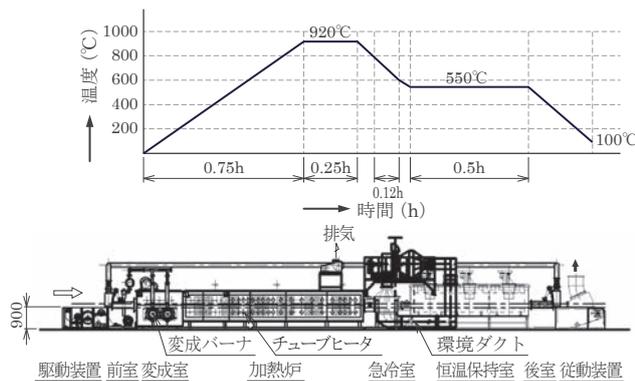


図2.8 等温焼ならし温度線図

5.4 光輝焼ならしに用いられる雰囲気

焼ならしの加熱保持条件は、オーステナイト状態にすることであり、加熱保持中に酸化・脱炭雰囲気中に被処理品が曝されないことが重要である。この目的のための雰囲気は、変成ガス雰囲気と単純ガス雰囲気があげられる。

変成ガス雰囲気は、一般に $\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$ の混合成分ガスである。

単純ガス雰囲気は、通常、窒素ガスに数%の水素を添加し使用される。

雰囲気については文献^{2~7)}を参考にさせていただきたい。

6. 焼なまし

焼なまし熱処理作業は以前、焼鈍（しょうどん）と呼ばれていた。JIS用語では“焼なまし”と呼ばれる。（“焼きなまし”ではない）この言葉から想像できるが、焼なましは焼入れと正反対の熱処理作業である。すなわち鋼の応力を除去し、鋼の組織を調整し柔らかくする熱処理であり、 A_{C3} 変態温度以上で行う焼なましと A_{C3} 変態温度以下で行う焼なましとに大別できる。以下に各種焼なましについて解説する。

6.1 完全焼なまし

焼なましというとは一般にはこの完全焼なましをいう。加熱温度範囲は、図2.9の青太線で示すように亜共析鋼では A_3 以上、過共析鋼では A_1 以上

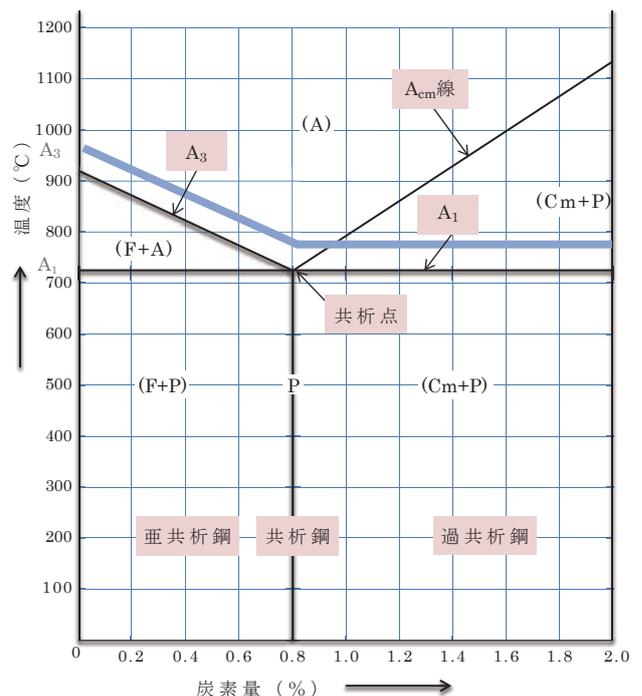


図2.9 焼なまし作業線図

約 50℃ 高い温度に加熱し約 20～100℃ / 時間で約 450℃ まで徐冷または炉冷する熱処理方法である。

亜共析鋼では組織はフェライトとパーライトになり、共析鋼においてはパーライト、過共析鋼の組織はセメントイト等の球状化炭化物とパーライト組織になり、概ね状態図の室温での組織になる。完全焼なましの作業線図を図 2.10 に示す。

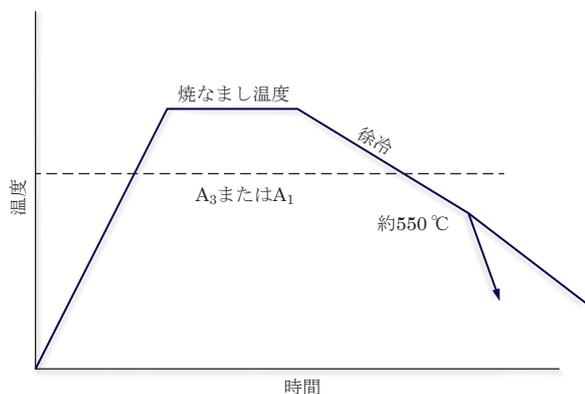


図 2.10 完全焼なまし作業図

炭素を含む鋼の雰囲気熱処理において、完全焼なましに CO-CO₂-H₂-H₂O-N₂ 系の変成型雰囲気を使用する場合、注意する点が浸炭・脱炭の問題である。特に CO-CO₂ の平衡において鋼の中の炭素濃度と雰囲気のカーボンポテンシャルを合わせながら徐冷することは、不可能に近い。言葉を変えるとカーボンポテンシャルは温度の関数であり、ゆっくり冷却される温度とともにカーボンポテンシャルを追従させることが困難であるということである。このため、CO ガスを少なくし炭素平衡型の雰囲気ではなく、窒素ベース系の雰囲気にすべきであるが、この場合は、露点すなわち水蒸気量または炉内酸素分圧をコントロールする必要がある。

以上のべたように変成型雰囲気を用い高温から徐冷もしくは炉冷する光輝完全焼なましは、脱炭・浸炭を防ぐことが難しい熱処理であり、この雰囲気にはカーボンポテンシャルを制御する必要のない窒素ベース型雰囲気を用いることが多い。

6.2 等温焼なまし

TTT 曲線（等温変態線図）を利用した焼なましで処理時間の短縮が図れる。つまり、A₁ 変態温度直上で等温保持しパーライト変態させる方法であり、熱処理作業線図を図 2.11 に示す。

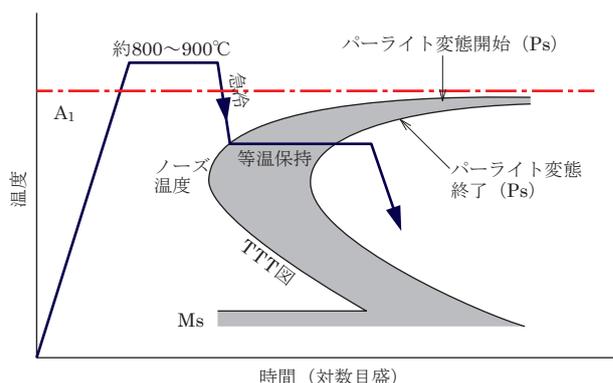


図 2.11 等温焼なまし作業図

6.3 球状化焼なまし

球状化焼なましとは、網目状や独立に析出した炭化物を球状化させ機械的性質や加工特性を向上させる熱処理の一つである。この方法には、製品の材質、大きさ、球状化の程度等により様々な方法がありそのヒートパターンが特許になっている場合も多い。図 2.12 に代表的な球状化焼きなまし方法を示した。

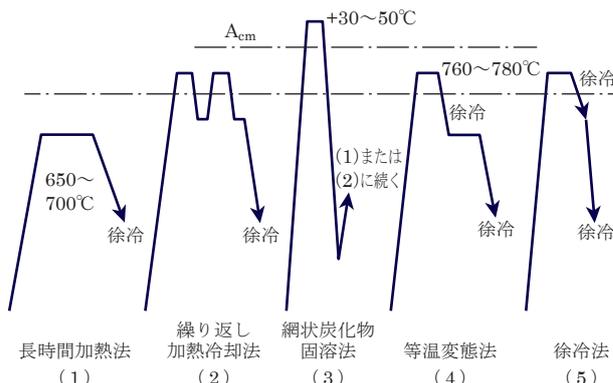


図 2.12 代表的な球状化焼なまし方法

(1)の方法は、A₁ 以下の温度で長時間加熱する方法であり実用的ではないが、すでに球状化処理がなされている材料が圧延、押し出しなどの冷間加工により加工硬化してしまった中間製品の応力を除去し軟化させ後工程に流す熱処理に用いられることが多く、残留応力のエネルギーにより球状化組織が促進される。この方法が多用されているのが冷間鍛造品業界で中間焼なましと呼ばれている。この場合の保持時間は 1mm あたり 2分から 5分程度である。

(2)の方法は、A₁～A₃ あるいは A_{cm} 点間の二層混合組織状態に加熱保持しその後 A₁ 点直下に急冷し保持することを数回繰り返す方法で加熱冷却法と呼ばれる。この方法は少量を実験室的に行う

には比較的短時間で球状化処理ができるが、処理量が多くバッチ炉のように大量にバスケットに入れて処理をする場合バスケットの内部と外部の温度差が大きく全体をこの加熱パターンで均一に加熱することは困難であり実際問題不可能に近い。また連続炉の場合も炉内構造が複雑になり、工業的にはあまり用いられていない。

(5)の方法は徐冷法と呼ばれ、一般的に用いられている方法である。方法としては、(2)と同様に、 $A_1 \sim A_3$ あるいは A_{cm} 点間の二相混合組織状態に加熱保持しその後 600°C 前後まで $5 \sim 20^\circ\text{C}/\text{時間}$ 程度の冷却速度で徐冷する方法である。この方法は最も時間のかかる方法ではあるが、多量に熱処理する場合、ばらつきの少ない方法である。この方法のポイントは必要な温度域をゆっくり冷却することであり、各社その方法にはノウハウを持っている。筆者も以前、どの温度範囲をどれくらいの冷却速度で処理したらどのような組織になるかを小さな炉を10基ほど使用し実験したことがある。

(4)の方法は(5)の方法の欠点である長時間処理を解消するための方法で、加熱保持方法は(5)と同じく $A_1 \sim A_3$ あるいは A_{cm} 点間の二層混合組織状態に加熱保持しその後 A_1 点直下に急冷し保持する方法で等温変態法と呼ばれている。この方法は徐冷区間がなく球状化に要する処理時間を短縮できる利点があるが、バッチ処理のようにある量全体を均一に等温変態域に急冷することが難しく、一部メッシュベルト式連続炉等の連続炉で使用されている。

球状化焼なましは古くから過共析鋼の工具鋼や軸受鋼等を対象に行われてきた熱処理である。これら材料の球状化焼なましの目的はセメントイトを合金鋼の場合は複合炭化物を球状化し耐磨耗性や耐衝撃性を向上させるために行われる。筆者は昔、近所の工場のオヤジさんから相談を受けた事がある。その内容は、ビールの王冠を作る金型がドイツ製で高価であるため硬さが同一の日本製に変えたが、その寿命が半分以下になってしまっている。という内容であった。早速内部の組織を顕微鏡にて観察したところ、ドイツ製の金型は過共析で球状化炭化物とマルテンサイトの二相組織であり、日本製のものは構造用合金鋼(SCM440)の亜共析鋼焼入れ組織のマルテンサイトのみの一相組織であった。これからもわかるように同じ硬さであっても内部組織により型の寿命

が格段に相違する。

ここで軸受鋼(SUJ2相当)の球状化焼なまし処理の実例を述べる。ここで取り上げた製品は軸受鋼のパイプである。

写真2.13は球状化処理前の組織であり、パーライトと結晶粒界に炭化物が見られる。これを図2.14の熱処理パターンで球状化焼なましを行った組織が写真2.15になる。

このように熱処理により組織がガラリと変化することが熱処理の冥利である。熱処理は外観が変化することはなく内部の組織が変化するため直ちに効



写真 2.13 球状化処理前組織

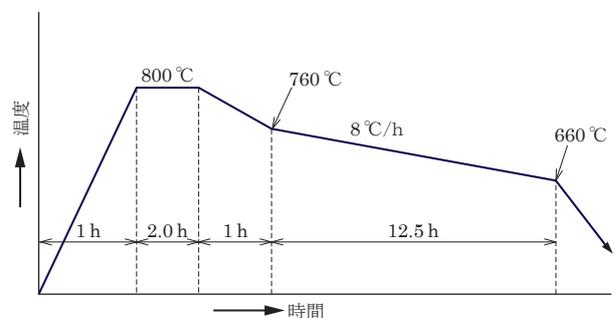


図 2.14 球状化熱処理線図の一例

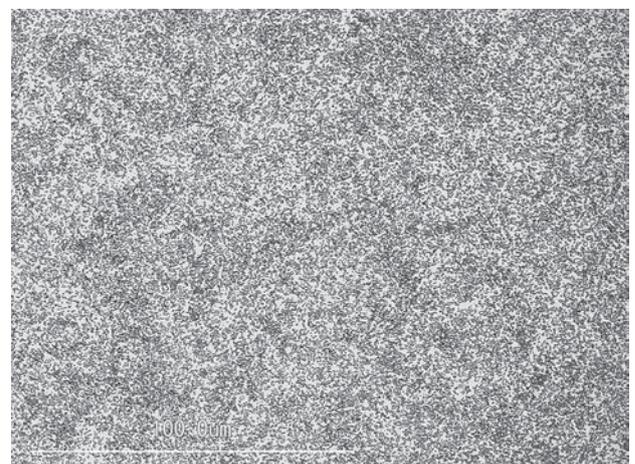


写真 2.15 代表的球状化組織

果を確認することが難しい熱加工とも言える。金属の組織を人の手相になぞられ金相と呼ぶこともあり、熱処理学とは金相を変える金相学といっても過言ではない。

以上述べた球状化焼なましは、過共析鋼の網目状炭化物を球状化する焼なましである。工具鋼や型鋼などの過共析鋼の球状化焼なましはほとんど製鋼メーカーで熱処理されて供給されるのが一般的であり熱処理専門社が熱処理に供することはほとんどない。

これに反し、亜共析鋼の球状化焼なましは、熱処理専門業者が委託加工として取り扱う機会が増えている。これは省エネルギーの観点から冷間鍛造や温間鍛造が多用されているからで、低炭素鋼及び中炭素鋼素材の冷間鍛造性を高めるために構造用鋼にも球状化焼きなましを行う。この場合、もし球状化焼なましにおいて浸炭してしまうと冷間鍛造性が極端に悪くなり最悪の場合は、表面に割れが発生しオシャカになってしまう。反対に脱炭が発生すると冷間鍛造後ほとんど切削加工工程がないために脱炭は製品の品質を維持できない大きな欠点となるので注意が必要である。

図 2.16 に冷間鍛造品の一連工程別解説図を掲げた。

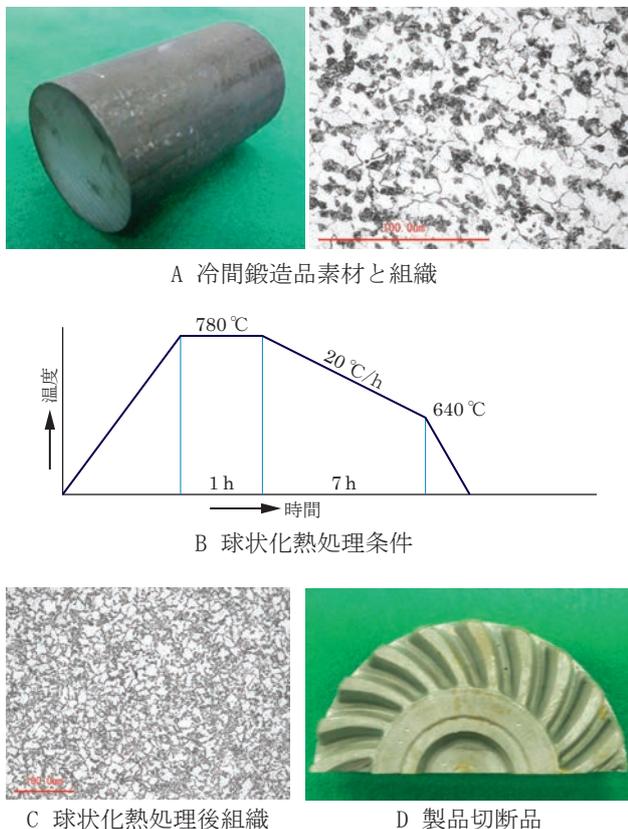


図 2.16 冷間鍛造品工程別解説図

この材料 A は SCM420 で素材の組織はパーライト+フェライトである。素材を B の熱処理条件で球状化処理をした組織が C であり、この状態で冷間鍛造をした製品が D となる。

6.4 応力除去焼なまし及び中間焼なまし

室温加工や溶接などにより発生した内部応力を除去するための焼なましを応力除去焼なましという。

これは我々が風呂に入るとストレスが取れるのと似ている。

また、複雑な製品形状の何工程にも及ぶ冷間鍛造（室温で加工されるが冷間鍛造という）では、加工硬化で硬くなってしまった中間製品を柔らかくする目的で行う焼なましを中間焼なましと呼ぶ。いずれも加熱温度は再結晶温度の約 450℃ 以上 A_{c1} 以下の温度範囲で行う図 2.17 のパターンを取る熱処理である。

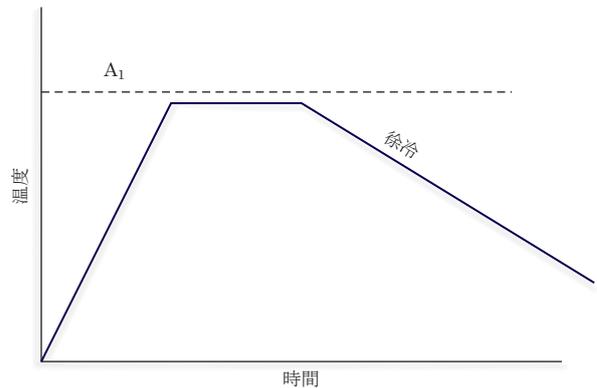


図 2.17 応力除去焼なまし及び中間焼なまし線図

ここで再結晶温度とは冷間加工により変形し歪んだ結晶粒が元の歪みのない結晶粒に戻る最低の温度である。一般金属の再結晶温度は、次式によって見積もることができる。

一般金属の再結晶温度 [K] = $0.4 \times$ 熔融温度 [K]
すなわち、鋼の場合熔融温度を 1500 [°C] として計算すると

鋼の再結晶温度 = $0.4 \times (1500 + 273) \div 709$ [K]
となり、436℃ で約 450℃ となる。

6.5 磁気焼なまし

自動車分野をはじめ各種制御部を持つ電気機器部品に磁気材料が多用されている。なかでも保持力が小さく透磁率が大きいことを特徴する軟磁

性材料は近年使用料が増加している。軟磁性材料の代表例として純鉄に代表される鉄系、モータ等にもちいられるケイ素鋼そして高ニッケル材料であるパーマロイ等様々な種類の材料が世の中に出回っている。

磁気特性を最大限に引き出す加工が熱処理であり、その目的は ① 加工歪等材料が残存した歪を可能な限り除去する。② 結晶粒を粗大化させる。ことが低い保持力及び高い透磁率特性を得るための主目的である。このとき用いられる熱処理が磁気焼なましである。加熱温度は鉄系、ケイ素鋼については、780～900℃程度、パーマロイについては、1000～1200℃に加熱保持されることが多い。

次に純鉄を例にとり熱処理条件と組織変化について述べる。

用いた製品は 約直径 28.5 × 高さ 40 mm 肉厚 1.2 mm の部品である。代表的な材料成分は C:0.003, Mn 0.39, 残り Fe である。

熱処理前の組織は写真 2.18 のように冷間加工され結晶粒が圧延方向に押しつぶされている組織を呈している。このときの保持力は約 500[A/m] 程度である。

図 2.19 に示す熱処理条件にて磁気焼なましを行った処理後の顕微鏡組織を写真 2.20 に示す。このときの保持力は 76.7 [A/m] 程度まで低下し、磁気材料として使用できるようになる。この熱処理の応用として 10% 前後の加工率が粗大結晶粒を誘発する現象を利用すると写真 2.21 の顕微鏡組織のように一部巨大結晶粒が発現し保持力も 38.5[A/m] と低下し特性が向上する。

最近、車の電動化でモータコアの磁気焼なましの引き合いが増えている。モータコアを構成する

	熱処理条件		
	処理時間 (h)	累計 (h)	温度 (°C)
—	0	0	0
昇温	1.5	1.5	850
保持	3	4.5	850
徐冷	3.5	8	500
急冷	1	9	0

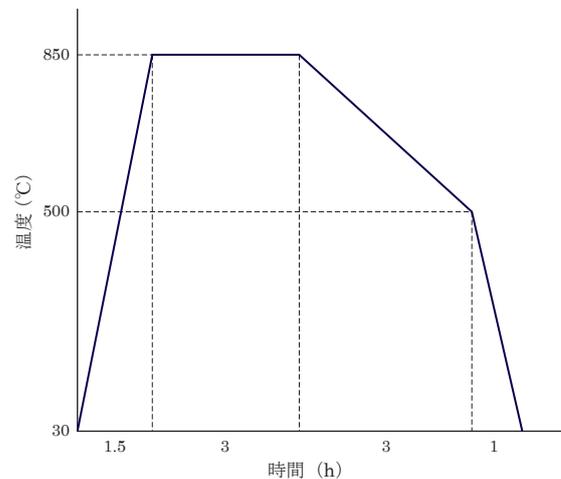


図 2.19 磁気焼なまし線図



写真 2.20 磁気焼なまし処理後組織



写真 2.18 磁気焼なまし処理前組織

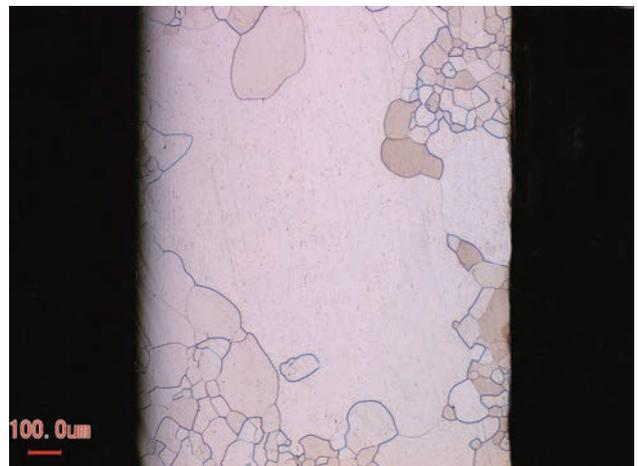


写真 2.21 磁気焼なまし処理後粗大結晶粒組織

無方向性電磁鋼板は、切断、引抜、曲げ加工時に加工歪が発生し、鉄損値（磁気特性）の劣化が生じる。そのために鉄損値を回復するために磁気焼なましが多用されるようになった。ここでは以下の事項に注意する必要がある。

- ① 製品が均一な温度になるまで加熱し保持するため炉内の温度分布が均一であることが必要である。
- ② 浸炭及び酸化は磁気特性の低下につながるため、炉内雰囲気管理を精密に管理する必要がある。
- ③ 防錆処理のブルーイング処理を行う場合、酸化している切断面を加熱炉内で還元し酸化膜の除去を行い500℃付近までのブルーイング直前まで還元雰囲気を維持し、製品を均一な温度で降温させ、高露点の触れさせる必要がある。
- ④ Fe-Si系磁気材料でSi含有量が約4%以上になるとA₃変態点がなくなるので注意が必要である。

発熱型雰囲気ガスを用いた代表的ヒートパターンと雰囲気を図2-22に示す。

磁気焼なましに用いられる雰囲気は、水素、窒素+水素、アルゴン+窒素等のガスそして発熱型雰囲気がある。硬質磁気材料である永久磁石には磁気焼なましは使用しない。

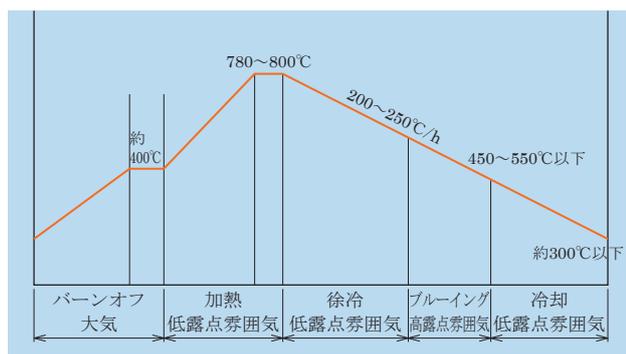


図 2.22 代表的な磁気焼なましと雰囲気

7. まとめ

熱処理基礎知識向上のための基礎講座の第二報として一般熱処理の焼ならし及び焼きましについて加熱・冷却方法のルールと熱処理設備及び光輝処理の雰囲気を含め解説した。2020年3月号と合わせて読んでいただくと理解が深まると思う。

次報は、焼入れ及び他の一般熱処理について解説する。

— 参考文献 —

- 1) 神田輝一：熱処理知識向上のための基礎講座；日本工業炉協会，vol. 57. No. 2，（2020. 3）