

NACHI-BUSINESS

Materials news

Vol. **6D1**
February/2005

マテリアル事業

■ 技術講座

知りたい材料・熱処理講座③

「熱処理にまつわる問題点・トラブルとその防止策」

Things to Know about Material and Heat Treatment
"Problems and Measures for Heat Treatment"

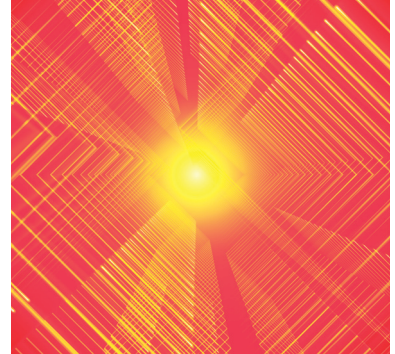
〈キーワード〉 熱処理変形・熱応力・変態応力・焼割れ・
サブゼロ処理

開発本部／開発三部

河 口 誠 司 Seiji Kawaguchi

監修 開発本部／開発三部

天 野 宏 地 Hirokuni Amano



要 旨

NACHIは、ものづくりの上流(材料・熱処理)から下流(加工・組立・メンテナンス)までの一連のプロセスにおいて、商品・技術・サービスを提供して、成長してまいりました。

材料・熱処理技術の本質と新たな動向を捉えることは、これからの”ものづくり”に欠かせないテーマです。

第2回までの講座で、熱処理の根幹をなす焼入れ・焼もどしのメカニズムをお話ししてきました。

第3回は、熱処理の大きな問題点である変形や割れが何故生じるのか、どうすれば軽減できるかを中心に解説していきます。

Abstract

Nachi has been providing our customers with products, technology and service from the beginning processes (such as materials and heat treatment) to the completing processes (such as machining, assembly and maintenance) and has been making a step forward.

It is essential in the future “manufacturing” that we understand the essence of materials, heat treatment technology and their new trends.

The second session introduced the mechanism of quenching and tempering that are the bases of heat treatment. In the third session, we will explain mainly why the major problems such as deformation and crack can occur in the process of heat treatment and how we can reduce such problems.

1. 熱処理変形

ひとくちに熱処理変形といっても、詳しく見ますと次の2つに分類されます。

①寸法の変化…

焼入れにともなう長さの伸び・縮み

焼入れ・焼もどしでは組織変態を伴うため、寸法変化は避けることができません。しかし、鋼の種類や熱処理後の組織または硬さを知れば、ある程度は予測できますから、熱処理ひずみに比べると問題になることは少ないものです。炭素鋼の焼入れ・焼もどしによる体積変化を表1に、高速度工具鋼SKH51の変寸率を図1に示します。

②形状の変化……

加熱、冷却に伴う曲がり・ねじれ

熱処理をしたときに、曲がりなどの形状の変化を起こすのは、おもに冷却中に材料内部に生じる応力が原因です。形状の変化が大きいかどうかは、材料内部における力の大きさや、その方向がどのようなものであるかに関係します。

表1.炭素鋼の焼入れ・焼もどしによる体積変化

組織変化	体積変化[%]
(フェライト+セメンタイト)⇄マルテンサイト	1.69 × (C%)
(フェライト+セメンタイト)⇄オーステナイト	-4.64+2.21 × (C%)
オーステナイト⇄マルテンサイト	4.75-0.53 × (C%)
オーステナイト⇄ベイナイト	4.75-1.47 × (C%)

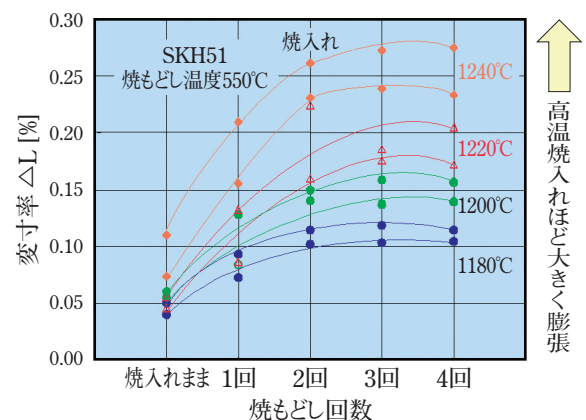


図1. SKH51の熱処理条件による変寸率の推移

2. 熱処理で生じる応力

(熱応力と変態応力)

熱処理で生じる応力は、冷間加工、^{※1}ショットピーニングや浸炭などで生じる応力と同様に、残留応力の1種ですが、熱処理条件によっては、非常に大きな応力となり、変形に与える影響も大きくなります。

処理品を急冷すると、処理品内外部の熱収縮差に起因する応力(熱応力)と、マルテンサイト変態変形が内外部で時間的にずれて起きたときに生じる応力(変態応力)の2種類の応力が生じます。

図2のような長い棒材について、冷却の時間経過にともなう、図の斜線部の応力を見た場合、図3のようになります。(a)が熱応力のみ作用する場合で、(b)が変態応力が生じる場合です。(b)では、表面が先に温度低下してマルテンサイト変態が始まり、大きく膨張します(図中①)。このときに中心はまだ高温ですと、中心部は外周部の膨張に対応して、塑

性変形で伸びます。次に、中心部がマルテンサイト変態により膨張しますと、外周部は冷えてしまっているため塑性変形できませんから、引張り応力を受けます(図中②)。

実際の熱処理の時に生じる応力は、熱応力と変態応力が組み合わさったものになります。応力の発生には、次のような因子が影響を及ぼします。

- ①冷却方法(冷却速度)
- ②炭素量(変態膨張量の違い)
- ③加熱温度(オーステナイトへの炭素、合金元素の溶解込み量)
- ④質量効果(材料の大きさや形状)
- ⑤材料の方向性、偏析、脱炭(素材の均一性)^{※2}

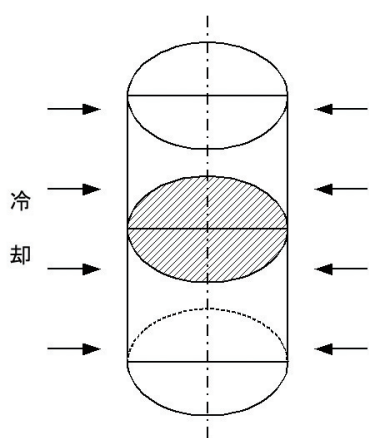


図2. 円柱の冷却

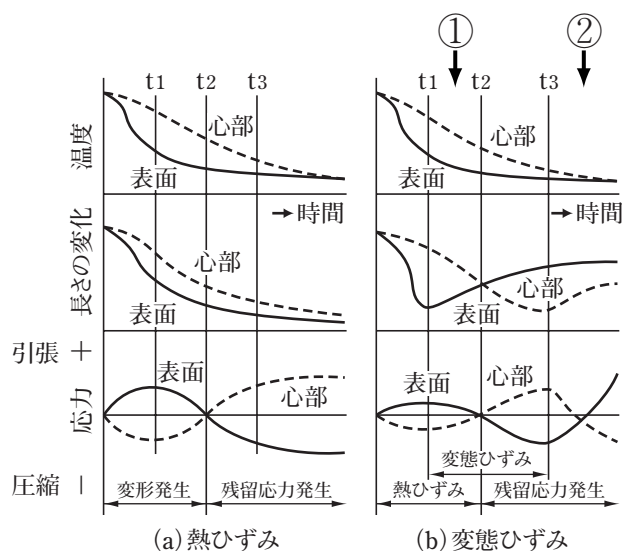


図3. 熱ひずみと変態ひずみの発生機構

3. 焼割れ

(曲がりと割れ)

曲がりや割れは、いずれも処理品内部に生じる応力が原因で生じます。処理品を急冷したときに、処理品が塑性変形できる場合には、応力の一部を解放する形で、曲がり・ねじれといった形状変化を生じます。塑性変形できない場合には、残留応力として処理品内部に残ります。

これが引張応力で、その値が材料の引張強度を超えた場合、その場所で割れが発生します。

(割れの原因)

割れの原因は、大きく分けて次の4つに分類されます。

①変態応力が主となるもの

焼入れによって、表面や薄肉部が先に冷却し、内部や厚肉部の冷却が遅くなると、表面や薄肉部には、内部や厚肉部の変態による引張り応力が発生し、その応力に耐えきれないと割れが発生します。このタイプは、焼入れ性のよい材料を急冷した場合に生じやすくなります。とくに、薄肉部、凹のコーナー部に生じやすく、また置割れを起こしやすい特徴があります。

②変態膨張量の部分差、熱応力によるもの

質量効果が大きく、表面のみ硬化して内部の変態膨張が少ない場合には、内部で大きな引張り応力が発生し、割れの原因となります。また、断面積部が急変するような部品の場合、冷却の早い小断面積部と、大面積部との間(断面急変部)に引張りの熱応力を生じ、割れを生じることがあります。

③表面欠陥によるもの

変態応力は表面に引張り応力となって現われます。表面にきず、ツールマークや肌あれなどがあると、応力集中によって割れが生じやすくなります。また、脱炭があると、その部分は正常部よりも変態膨張量が少なくなりますから、引張り応力が増大して割れが発生しやすくなります。

④組織不良によるもの(強さの低下)

焼入れ温度が高すぎて、結晶粒の粗大化や、網状セメンタイトなどを生成して強さが低下すると、発生応力が材料の強さを上回り、割れの発生をまねくこととなります。また偏析があると、応力が増大し、割れやすくなります。

焼割れが生じる原因の一例を、図4に示します。焼割れは、単独の要因で生じる場合は少なく、いくつかの要因が組合わさって生じています。

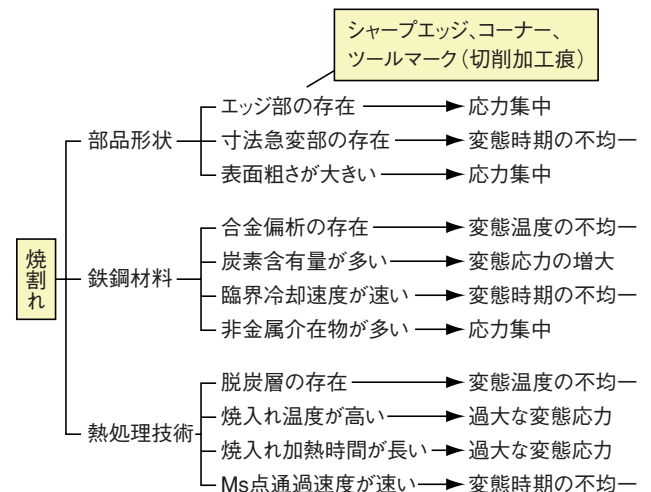


図4. 焼割れの原因と発生機構

一口メモ

「熱処理の現場用語」

- ①蒸気焼入れ (Steam quenching) ……水蒸気で冷却する方法。鋼線のオーステンパリング法に用いられる。
- ②階段焼入れ (Stepped quenching) ……時間焼入れ、熱浴焼入れなどの総称。
- ③はさみ焼入れ (Die quenching) ……金型焼入れともいわれ、プレスクエンチングの一種。

4. 変形・割れを防止するには

これまで、熱処理変形・割れについて説明してきましたが、それではどうしたら変形や割れを軽減できるのでしょうか。それには、以下の事柄が有効になります。

①加熱ムラをなくす

処理品を、焼入れ加熱する場合の炉内温度と材料温度は、図5に示すような変化を見せます。昇温速度にばらつきがある場合や、焼入れ炉内の温度分布にムラがあると、熱応力や変態応力が不均一となり、変形しやすくなりますので、注意が必要です。

高合金鋼のように熱伝導度が小さく、大きな熱応力を発生するような場合には、(とくに変態点付近で)予熱をすると、本加熱温度に昇温したときに内外の温度差が小さくなり、変形防止に有効です。

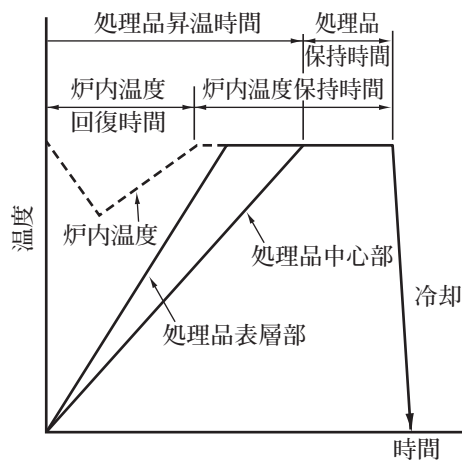


図5. 炉内温度と処理品温度

②材料が自重で変形しにくいようにする

焼入れ加熱温度は高温のため、処理品の保持方法が不適当だと、加熱中に自重で変形を生じます。長尺材料は、垂直に吊り下げて加熱し、自重による変形を防止します。

③冷却速度のばらつきをなくす

処理品の冷却速度は、場所によらず均一にするような工夫が必要です。つめ物や当て物をするのが有効になります。局部的な冷却速度調整の例を図6に示します。

厚肉の材料では、中心部まで十分に冷却した後、焼もどしを行ないます。中心部が十分に冷えないうちに焼もどしをすると、焼入れ後の中心部は残留オーステナイトが多くなり、焼もどし後の冷却でマルテンサイト変態を起こして、割れが発生することがあります。

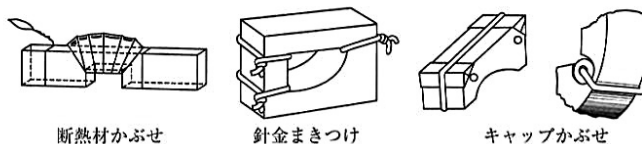


図6. 局部的な冷却調整のやり方

④形状・素材の吟味

一般に、形状が単純な場合には、割れたり、曲がったりしにくいものです。部品の設計でシャープコーナーや断面急変部を避け、対称形になるようにすれば、割れ・曲がりを低減することができます。また、脱炭、偏析、酸化スケールなどのない、品質の良好な素材を使うようにするのはいうまでもありません。

⑤冷却方法の工夫

焼入れの時に、焼入れ保持温度から500℃位までを急冷してやれば、その後をゆっくり冷却しても、マルテンサイトに変態することが分かっています(詳細は省きます)。

また、変態応力は、処理品の内外部で変態の時間差が生じるために生じます。ということは、Ms点付近で、各部の温度差が小さくなるように(内・外部が同時にマルテンサイト変態するように)ゆっくり冷却してやれば、変態応力を小さく抑えることができます。

この考え方を活用した熱処理方法に、マルクエンチ、マルテンパ、引き上げ焼入れといった方法があります。

(機械的矯正)

これまでは、金属内部の組織変化のさせかたを工夫して、焼入れ応力を小さくする方法を説明してきました。それらとはまったく別の方法として、マルテンサイトが生成し、急激に体積膨張するさいに、機械的に外部から力を加えて焼入れ・ひずみの発生を防止するのも有効な方法です。機械的な矯正には、機械で矯正しながら油を吹き付けて冷却する方法や、水や油で短時間冷却した後、処理品が完全に冷えきらないうちに機械で矯正する方式など、いろいろな方法があります。なお、この方法は、形状に制限があり、多種少量生産には不向きです。

(サブゼロ処理)

常温までの急冷で、残留オーステナイトを生じる鋼を、そのまま常温以下まで冷却を続けると、Mf点(マルテンサイト変態が完了する温度)に達するまで、オーステナイトはマルテンサイトへと変態し続け、そこでほとんどマルテンサイトに変態してしまいます。このように、サブゼロ(Subzero)温度、つまり、0℃以下まで冷却する操作をサブゼロ処理と呼んでいます。

オーステナイトは、冷却途中の温度でいったん保持すると、安定化してマルテンサイトへ変態しにくくなる性質があります。一般に、処理品の放置時間が長いほど、放置温度が高いほど、生成したマルテンサイト量が多いほど、安定化しやすくなります。また、ゆっくり冷却した場合にも安定化が起きます。

オーステナイト安定化の一例を図7に示します。焼入れた高速度工具鋼SKH2を常温に放置した後に、サブゼロ処理を行なった場合、放置時間が伸びるにしたがって、変化再開温度が降下し、変化量が少なくなっていることがわかります。

サブゼロ処理の効果

①置割れの防止

サブゼロ処理は、前述した置割れの原因となる残留オーステナイトをほぼ消滅させるので、置割れを防止する効果があります。一般には、焼入れ後焼もどしを行ない、残留オーステナイトを分解または安定化し、もろいマルテンサイトを粘い焼もどしマルテンサイトに変えておく方法がとられます。

②経年変形の抑制

ゲージなど、高い寸法精度が要求されるものに対しては、使用中の寸法変化を極力おさえなければなりません。サブゼロ処理は、この経年変形防止に効果的です。

③硬さとじん性に対する効果

残留オーステナイトをマルテンサイト化すれば、当然、硬さも上昇します。ですから、焼入れた鋼にサブゼロ処理を施せば、硬さが上昇します。しかし、その反面、じん性が低下します。浸炭窒化表面の残留オーステナイトによる硬さ低下の回復には、サブゼロ処理はたいへん有効です。

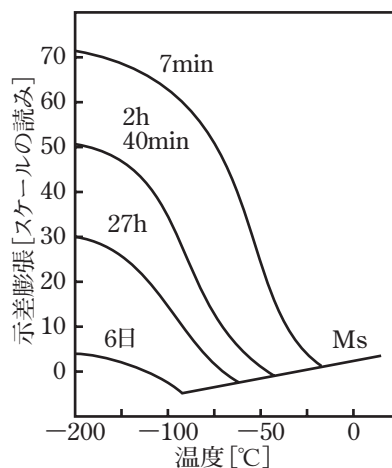


図7. 焼入れた高速度工具鋼の室温放置時間とマルテンサイト変態に及ぼす影響 (SKH2、1300℃焼入れ)

5. その他の熱処理トラブル

(過熱)

鋼を融点近くの温度に過熱すると、結晶粒は著しく粗大化して、その一部が溶融した組織、いわゆる燃焼した組織になります。このようになると、鋼は非常に弱く、脆くなって、打撃すれば簡単に亀裂を生じます。元の正常な鋼に戻すことは不可能ですから、正常な加熱温度を厳守する必要があります。

(真空焼入れ特有の欠陥)

真空焼入れを行なう際には、治具などからのCr蒸着という問題があります。熱処理バスケットによく使用されるSUS304の加熱時圧力と表面Cr濃度との関係を図8に示しますが、圧力が低いほどCrが多量に蒸発しています。蒸発したCrが製品に蒸着すると、表面のCr濃度が高くなって、Ms点が低下するため、残留オーステナイトが異常増加する場合があります。Cr蒸着した試料の断面組織を図9に示します。

この場合、焼入れ加熱時の圧力を高めて元素の蒸発を抑えたり、新作治具は使用前にいちど空焼しておくことで防止できます。

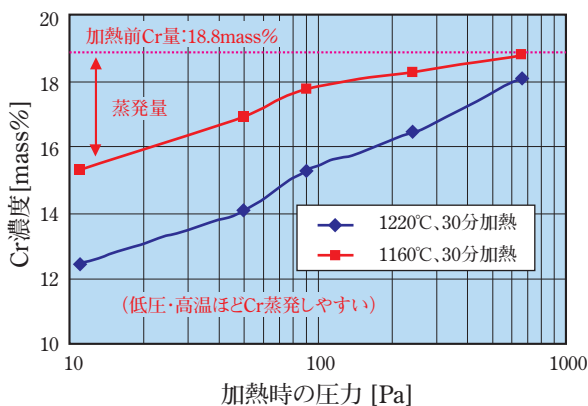


図8. SUS304の表面Cr濃度と加熱時圧力

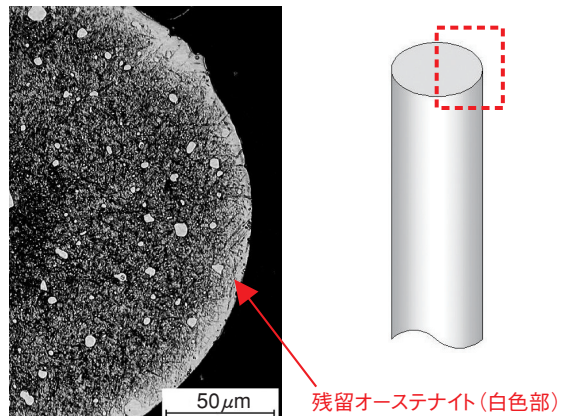


図9. Cr蒸着したSKH51細線の断面組織

(放電加工変質層)

焼入れ焼もどし後にワイヤカットなどの放電加工を行なうことがあります。このとき、加工部には白層が生成します。これは加工面が溶融してマルテンサイト+残留オーステナイトになったためです。一例を図10に示します。対策としては加工後に焼もどしを追加するか、ショットブラストなどの機械加工により、加工変質層(白層)を除去する必要があります。

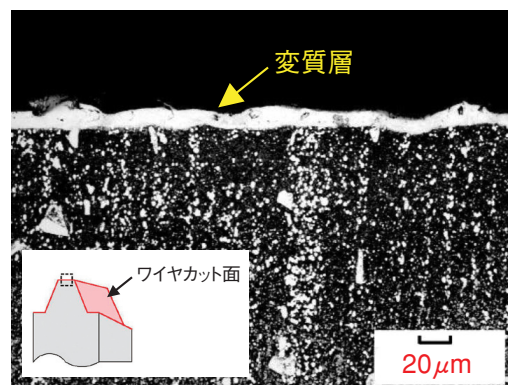


図10. HS93R製バイト刃先の放電加工变质層

6. まとめ

熱処理では、硬化する目的で組織を変化させます。ですから、寸法が変化するのは避けられません。そのことをふまえた上で、必要な熱処理温度・方法や適切な鋼材選択をして、変形をできるだけ一様にし、また少なくすることが必要といえます。

今までは、「熱処理とは」という観点から、熱処理に関わる基礎的な解説を行なってきました。

次回からは、材料と熱処理をどう使うか、より使用者に近い視点で紹介していきます。

用語解説

※1 ショットピーニング

球状微物(ショット)を鋼材の表面に噴射し、表面層に残留圧縮応力を生じさせ、かつ、加工硬化させながらある程度の仕上げ度を保持させる方法。

※2 脱炭

鉄鋼製品表面において、炭素濃度が本来の値よりも低くなる現象をいう。

※3 置割れ

焼入れ後に処理品を長期間放置すると、中心部の残留オーステナイトがしだいにマルテンサイトに変態して内部応力が増大し、割れる場合がある。これを置割れという。

一口メモ

「セメントait」

炭化鉄 Fe_3C (炭素量6.67wt%)は、金属顕微鏡を発明し、金属組織学の始祖とも言われるH.C.Sorby(英:1826~1908)によって発見され、Howe(米:1848~1922)の提言によってセメントait(Cementite)と命名された。脆く硬い組織で、210℃以下では磁性を持っている。日本では、本多光太郎博士により、“脆面体”と当て字されている。

「パーライト」

パーライトは、セメントaitとフェライトの薄片(厚さ2.5/10000~5/10000mm)が互いに層状になっており、顕微鏡で見ると、ちょうど真珠(pearl)のような光沢を呈するところから、pearliteと名付けられた。

日本語では“波来土”と当て字するのは、本多光太郎博士が、パーライトを見て、これが波打ち際の砂模様似ているので波来土としたことからです。

「ベイナイト」

パーライトが形成される温度と、マルテンサイトが形成され始める温度との間の温度間隔で形成される準安定構成物。高温変態の研究で名高いE.C.Bain(米:1891~1971)の名にちなんで命名された。

一般に、上記温度間隔の高温で形成される上部ベイナイトと上記の温度間隔の低温で形成される下部ベイナイトに区別される。

<注記>

本稿は、不二越熱処理研究会著「新・知りたい熱処理」ジャパンマシニスト社を引用しています。

関連記事

1) 浅田泰弘：知りたい材料・熱処理①「材料を強くする熱処理」
NACHI-BUSINESS news Vol.4 D1、August/2004

2) 河口誠司：知りたい材料・熱処理講座②
「硬さと粘り強さをあたえる焼入れ焼もどし」
NACHI-BUSINESS news Vol.5 D1、November/2004