

# NACHI-BUSINESS

Materials news

Vol. **5** D1  
November/2004

マテリアル事業

■ 技術講座

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」

Things to know about Material and Heat Treatment  
"Quenching and Tempering for Hardness and Toughness"

〈キーワード〉 状態図・焼入れ・焼もどし・マルテンサイト  
残留オーステナイト・二次硬化・炭化物

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1回の講座では、熱処理を理解するために必要な金属の硬さや強さの概念と、代表的な熱処理方法などについて話をしてきました。

第2回は、熱処理の考え方の基礎となる平衡状態図の見方を紹介するとともに、熱処理の根幹をなす、焼入れ・焼もどしについて注目し、金属のなかで一体何が起きているのか、そのメカニズムを解説していきます。

## 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). We have been growing as we satisfy our customer needs.

We strongly believe that the deeper knowledge on the essence of materials and heat treatment technologies and their trends is essential to manufacturing.

The basics of heat treatment such as necessary concept to understand heat treatment and the typical heat-treatment methods are taught in the first session of this seminar.

The second session introduces the equilibrium diagram on which the concept of heat treatment is based and focuses on the bases of heat treatment such as quenching and tempering with the explanation of each step.

## 1. 鋼の平衡状態図

### (鉄の変態)

鉄は固体の状態でも、加熱や冷却によって、異なる結晶形に変化します。これを変態といいます。純鉄の場合、加熱・冷却で次のような結晶構造の変化をします。

911°C (A3点)      1392°C (A4点)      1536°C (融点)  
 $\alpha$ 鉄  $\longleftrightarrow$   $\gamma$ 鉄  $\longleftrightarrow$   $\delta$ 鉄  $\longleftrightarrow$  液体

### (鉄-炭素系平衡状態図)

何種類かの物質を混ぜ合わせたとき、温度や圧力の変化によって、状態や性質がどのように変わるかを描いた図を状態図といいます。

一般に、工業用材料として使用される鋼は、鉄に炭素が固溶した合金ですが、この場合の温度による組織の変化を表したのが、図1に示す鉄-炭素系平衡状態図です。この図は、熱処理を考えるうえで基礎となる重要な図です。

鉄と炭素の合金は、図1の液相線の温度以上では完全に溶けた状態で、固相線の温度以下では、完全な固体の状態になります。その間は、融体と固体が混合しています。

なお、ここで扱う鋼の熱処理は、固相線(図においてAHJECF線)の温度以下で行なう処理と考えてさしつかえありません。

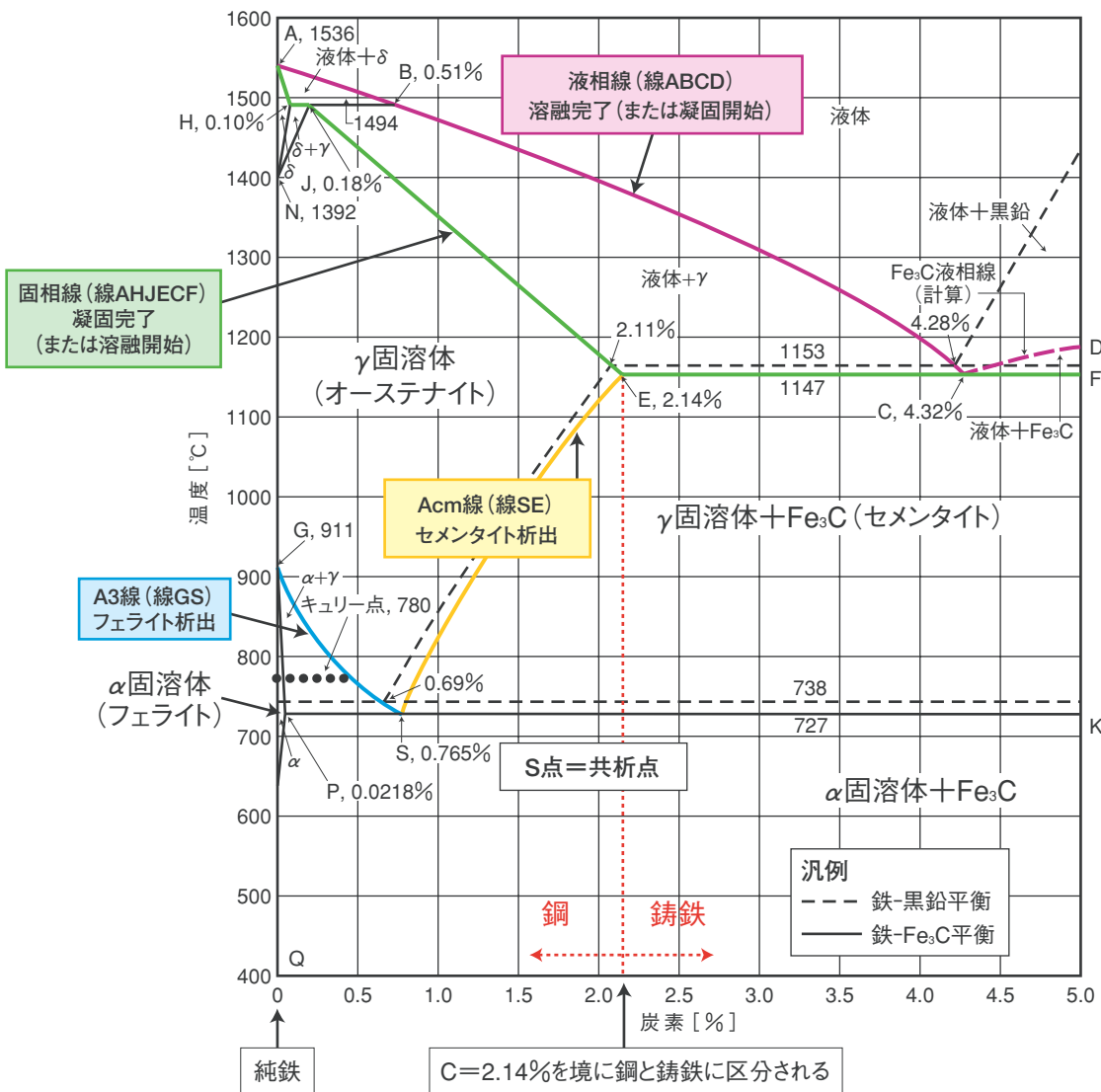


図1. 鉄-炭素系平衡状態図

一口メモ

「フェライト」

鉄鋼の金属組織として、 $\alpha$ 固溶体をフェライトと呼んでいます。このフェライト (Ferrite) は、セメンタイト、パーライトを発見したHenry Clifton Sorby (英:1826~1908) が発見しています。命名はHowe (米:1848~1922) が1888年にしています。

最近では、コンピュータの記憶用材料やスピーカーなどに使用される材料としてフェライトがありますが、これは酸化鉄と金属酸化物 (ニッケル、マンガンを) を焼き固めた磁性材料のことをいっています。

「オーステナイト」

焼入れ組織、マルテンサイトを得るためには、オーステナイト領域にまで加熱する必要があります。このオーステナイト、英語ではAusteniteとスペルしますが、これは英国人、W.C.Robert Austen (英:1843~1902) の名に由来しています。オーステンは、焼入れ硬化に関する研究をしていたオズモンド (仏:F.Osmond 1849~1912) と、初めて鉄-炭素系合金状態図を構想しました。そして、焼入れ鋼にマルテンサイトとともに存在する炭素含有量の高い第2の灰色の柔らかい物質 (オーステナイト) を発見したのです。命名は共同研究者のオズモンドです。

しかし当時は、高温にするとオーステナイトになるとは明らかになっていなかったので、この発見は、残留オーステナイトからのものだったのでしょうか。なお、漢字では本多博士が“大洲田”と当て字されました。

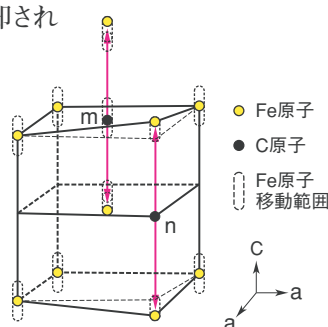
## 2. 焼入れとは

### (マルテンサイトとは)

図1の鉄-炭素系平衡状態図は、温度を極めてゆっくり変化させた場合の変化を示したものです。では、<sup>※1</sup>オーステナイトの状態から、きわめて速く冷却したらどうなるでしょうか。

本来、ゆっくりと冷却すれば、炭素が拡散して炭化物(Fe<sub>3</sub>C)が析出し始めるのですが、急冷すると、炭素原子は拡散する時間がないので、オーステナイトに固溶したまま、冷却され

ある温度以下で別の結晶形に変化します。この組織をマルテンサイトといい、この変態をマルテンサイト変態と呼んでいます。図2にマルテンサイト格子の模式図を示しておきます。



α鉄ではC原子はサイコロの面の中心mと辺の中点n(8面体位置という)に入るから、C原子は6個の最近接のFe原子のうち2個に対して著しい変位を与えることになる。

図2. マルテンサイト結晶格子の模式図

### Ms点とMf点

上述のように、オーステナイトからマルテンサイトへの変態が起こり始める温度をMs点(M:マルテンサイト,s:スタート)と呼んでいます。また、変態の完了する温度をMf点(f:フィニッシュ)といいます。Ms点はおよそ200℃前後ですが、オーステナイトの合金成分により変わってきます。Mf点も同様に、合金成分によって変化します。

### (残留オーステナイトとは)

鋼を焼入れした場合、その鋼のMf点が室温以下になると、まだ変態を完了していないオーステナイトは、そのまま焼入れ後も残ることになります。これを残留オーステナイトといいます。

<sup>※2</sup>残留オーステナイトは、硬さを低くする、経年変形などのわるい方の働き、いわゆる欠点と、じん性、転がり疲れ強さを向上させるよい方の働き、つまり長所とを合わせもっています。

### (焼入れの目的)

焼入れのいちばんの目的は、硬さを得ることです。鋼をオーステナイト状態から急冷、つまり焼入れすることで、マルテンサイトと呼ばれる非常に硬い組織が得られます。

### 炭素鋼・低合金鋼の場合

この場合、焼入れの目的は2つに分かれます。

その1つは、焼入れで得られる高炭素マルテンサイトの硬さをそのまま利用して、耐摩耗性の高い部品や、強さの大きい部品を得ようとするものです。この場合、焼入れたままのマルテンサイトはもろくて不安定なため、200℃以下の低温で焼もどして使用します。

もう1つは、強さとじん性を兼ね備えることが必要な機械構造部品などの場合です。このようなときには、焼入れでマルテンサイト組織にしたあとに、550～650℃といった高温で焼もどしを行ないます。こうすることで、そのほかの熱処理をしたものに比べ、同一強さにおいてじん性がたいへん優れた鋼が得られます。

### 高合金鋼の場合

高合金鋼の焼き入れ温度は、低合金鋼と比べてずっと高いところに設定します。高速度工具鋼では、溶融開始温度すれすれまでにすることもあります。<sup>※3</sup>こうすることで、炭化物の形で存在する合金元素を十分にオーステナイトに固溶させることができます。

高合金化したオーステナイトを急冷すると、そのままの成分のマルテンサイトと残留オーステナイトの混合組織が得られます。この組織を高温で焼もどすと、炭化物の析出、または残留オーステナイトのマルテンサイト化により、耐熱性が高く、安定で、しかも硬い組織が得られます。

#### 一口メモ「マルテンサイト」

マルテンサイト(Martensite)とは、焼入れによって得られる硬い組織ですが、この名は、Adolf Martens(独:1850～1914)の名に由来しています。

プロイセンの国有鉄道の橋梁技術師であったマルテンスは、自費で鉄道材料の調査のため、ソルビーによって緒を切られた顕微鏡による組織の研究を開始しました。そして、1878年1月、ドイツ技術者連盟の会報に“鉄の顕微鏡調査”と題して研究を発表しました。

漢字で当て字をしますと、マルテンサイトは“麻留田”となります。発見者はMartensでないという説もありますが、鉄鋼の組織研究に貢献していますから、その名に由来してのことと思われます。

## (焼入れのメカニズム)

それではこれまでの説明を頭において、焼入れのメカニズムについてふれていきます。

鋼を焼入れする場合、加熱によりオーステナイト状態にします。この状態では、鉄の原子の間に炭素原子が、合金鋼ではクロムやタングステン、バナジウム、モリブデンなど炭化物を形成する元素も固溶しています。

この状態で急冷すると、固溶した炭素や合金元素は拡散せずに、鋼はマルテンサイト組織に変化します(無拡散変態)。このマルテンサイトと呼ばれる組織はたいへん硬い特徴をもっています。

その理由は、過飽和に固溶した元素による固溶強化や、大量に含んだ転位がお互いにかみ合っていて動きにくくなるためです。さらに、この転位に固着した炭素原子が転位の動きを妨げることによる効果(コッレル効果)によっても強化されます。

また合金鋼は、原子と大きさが違う元素が固溶することによる強化や、それらの元素が炭化物を形成することによる析出硬化、また、炭化物自体の硬さによる硬化など、いくつかのメカニズムが複合されて強化されます。

## (冷却速度について)

一般に、焼きを入れるといいますが、非常に硬くなることであるように受取られています。ところが、理想的な速い冷却速度で焼入れしたときの硬さは、炭素鋼、低合金鋼では、合金量には関係なく、ほとんど炭素量だけで決定されます。(図3) いかえますと、炭素量が低い鋼の場合には、理想的な焼入れを行っても、高い硬さは得られないのです。

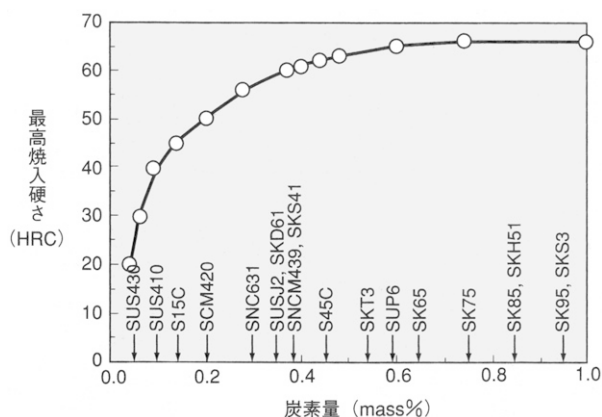


図3. 最高焼入れ硬さと炭素量の関係

同一の鋼種で直径の違う丸棒を油焼入れしたときの、断面の硬さ分布を図4に示します。図では、表面から中心に近づくにつれて硬さが低下していますが、中心の方が冷却速度が遅いため、その影響が表われているからです。

また、図4は処理品の直径が大きいほど、硬さが低下しています。このように、処理品が大きくなるにつれて、焼きが入りにくくなる性質を質量効果といいます。

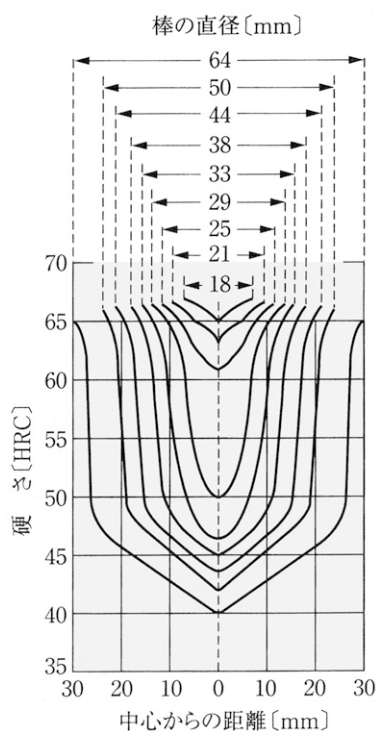


図4. 直径の異なる丸棒の断面硬さ分布

# 3. 焼もどしとは

焼入れで得られたマルテンサイトは、硬いけれども、もろい性質をもっています。また、マクロ的、ミクロ的な残留応力の影響もあり、硬い割には、じん性、強さ、疲れ強さ、耐摩耗性はそれほど大きくありません。

そこで、適当な温度に加熱する“焼もどし”によって、硬さ(強さ)とじん性の調整を行ないます。

## (焼もどしの目的)

### 炭素鋼・低合金鋼の場合

一般的に、炭素鋼・合金鋼の焼もどしは、次の効果を狙って行なわれます。

#### ① 残留(内部)応力の除去

鋼を焼入れたとき、その内部には変態に伴う応力と、熱収縮の場所によるばらつきに伴う応力が残ります。これを残留応力(内部応力)と呼んでいます。

残留応力があると、その状態(引張・圧縮)によっては割れたり、疲れ強さが低くなるなどの弊害を生じます。このため、材料を焼もどしすることで残留応力の除去を行ないます。このとき、加熱温度は高いほど、材料の塑性変形が容易になり、応力が緩和除去されやすくなります。

焼もどし温度が高くなると応力が緩和される様子を図5に、焼もどし温度によって耐摩耗性が変化する様子を図6に示します。

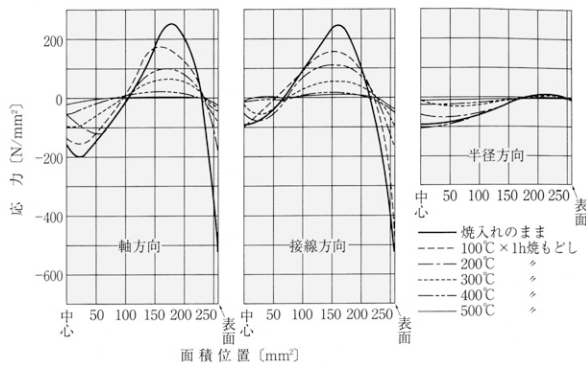


図5. 残留応力分布に及ぼす焼もどし温度の影響

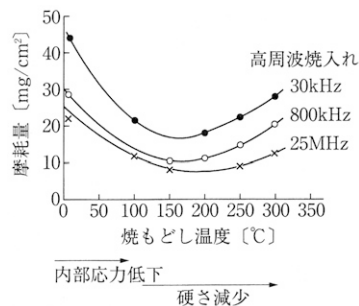


図6. 内部応力と摩耗量の関係

#### ② 硬さとじん性の調整

先にも述べましたが、焼き入れたままのマルテンサイトは硬いけれども、もろい組織です。このため、硬さ(強さ)とじん性を調整する目的で焼もどしを行ないます。

焼もどしによる機械的性質の変化の一例を図7に示します。300°C~450°Cの温度範囲で焼もどしをすると、衝撃値が下がっていることが分かります。これを、低温焼もどし脆性といいます。このため、実用上はこの温度範囲は避けて焼もどしを行ないます。

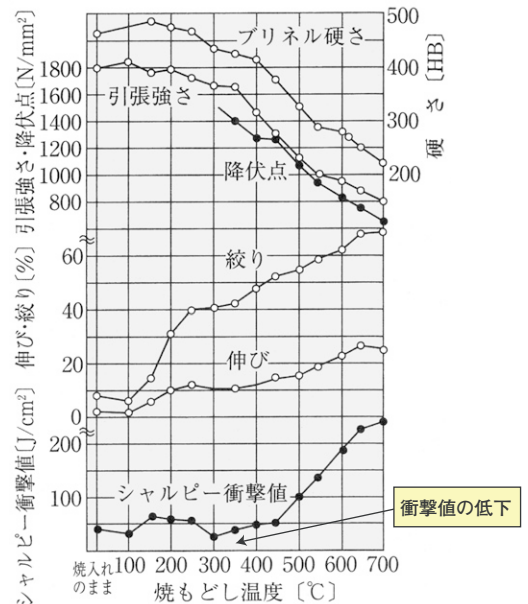


図7. クロムモリブデン鋼(SCM435)の焼もどしによる機械的性質の変化

### ③ 寸法、形状の安定化

焼入れしたままの鋼は、非常に不安定な状態にあるため、長時間常温で放置しますと、残留オーステナイトが徐々にマルテンサイトへの変化を起して膨張し、内部応力が增大して形状・寸法の変化を生じたり、割れてしまうことがあります。そこで、適当な温度に加熱して、これらの変化を促進してやれば、その後の変化をわずかな量にすることができます。(図8)

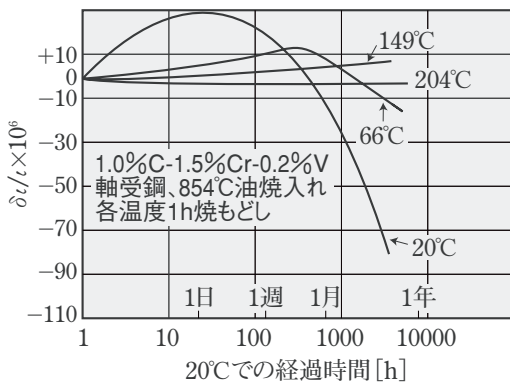


図8. 焼入れ、焼もどしをした軸受鋼の経年変化

以上の効果をふまえた上で、要求硬さ、要求する機械的性質によって、焼もどし温度を選定する必要があります。また、焼もどし時間は、部品の大きさにもよりますが、1~2時間が一般的です。

一例を以下に記します。

- 硬さ(耐変形・耐摩耗)が必要な部品…  
150~200°C程度の低温焼もどし
- 十分なじん性を必要とする機械構造部品…  
550~650°Cの高温で焼もどし(調質)

## 高合金鋼の場合(二次硬化)

高合金鋼の焼もどしの目的は、炭素鋼・低合金鋼の場合で述べた、

- ① 残留応力の除去
- ② 硬さとじん性の調整
- ③ 寸法、形状の安定化

の3つの目的はもちろんありますが、その最大の特徴は次で説明する、二次硬化にあります。

高速度工具鋼や熱間型用鋼に代表されるような、クロム、タングステン、モリブデン、バナジウムなどの炭化物形成元素を添加した鋼では、焼もどしをしても硬さの低下がきわめて少なかったり、500~600°Cの焼もどしで逆に硬さが増加して極大値を示すようになります。この現象を二次硬化といいます。二次硬化を起こす鋼では、高温焼もどしではじめてその特性を発揮します。図9にSKH51の焼入れ焼もどし硬さを示します。

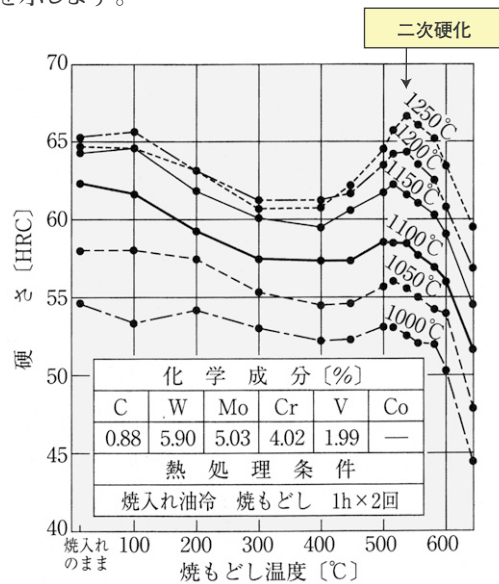


図9. SKH51の焼入れ焼もどし硬さ

## (焼もどしのメカニズム)

### 炭素鋼の焼もどし

炭素鋼や低合金鋼を、温度を変えて焼もどすと、硬さだけでなく、体積なども変化します。そのからくりについて詳細は省きますが、表1、図10のような組織変化によるものといわれています。

表1.炭素鋼の低温焼もどしによる組織の変化

過程	温度範囲[℃]	組織の変化
第1過程	20~200	マルテンサイト⇨低炭素マルテンサイト+ε炭化物
第2過程	120~200	オーステナイト⇨ベイナイト
第3過程	200~400	低炭素マルテンサイト⇨フェライト+セメンタイト

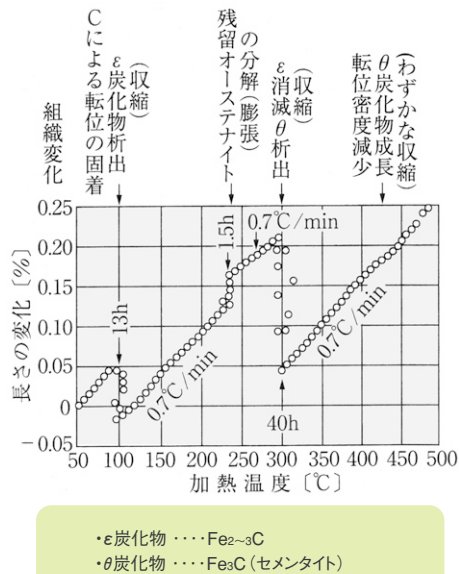


図10. 焼入れした0.97%炭素鋼の加熱に伴う長さの変化とこれに対応する組織変化

•ε炭化物 …… $Fe_2-3C$   
•θ炭化物 …… $Fe_3C$ (セメンタイト)

### 合金鋼の焼もどし

鋼に添加する合金元素は、元素の種類と量によっていろいろな働きをもっています。その働きは以下のようになります。

- 炭化物の析出、凝集を遅らせ、焼もどし軟化抵抗を大きくする  
これについては、合金元素の種類によって効果の大小があります。
- 残留オーステナイトを増加させる  
合金元素は、焼入れ時の加熱によってオーステナイトに固溶すると、オーステナイトを安定化させ、残留オーステナイトを増加させる傾向があります。
- 炭化物が析出する  
合金鋼を焼入れすると、炭素および合金元素を固溶したマルテンサイトができます。これを焼もどすときに、温度が400~450℃を越えまると、合金元素も拡散できるようになり、固溶していた合金元素と炭素原子が反応して、炭化物が微細に析出して硬化します。

高速度工具鋼などの高合金鋼では、高温焼もどしにより、残留オーステナイトが不安定となってマルテンサイトへと変態し、その結果硬化する場合があります。この残留オーステナイトの分解による硬化と、炭化物の微細析出による硬化が、二次硬化(焼もどし硬化)の原因と考えられます。

二次硬化鋼の焼もどしは、要求硬さ、機械的性質によって、硬さのピークを越えるように、焼もどし温度と時間を設定します。とくに、多量の残留オーステナイトの分解が二次硬化に関係するときには、2~3回以上の繰返し焼もどしを行ないます。

## 5. まとめ

鋼の熱処理は、鋼に所要の性質を与えるため、固体状態の鋼を加熱し、ひき続いて冷却する一連の操作です。その中で、焼入れ・焼もどしが果たす役割について紹介してきました。それらを理解した上で、製品の種類や使用目的に応じて、適切な強さやじん性を与える熱処理(焼入れ-焼もどし)条件を選定することが非常に重要となります。

なお、実際の熱処理に際しては、曲がり・割れなど色々なトラブルが生じることは御存知かと思ひます。

今回は、熱処理にまつわる問題点・トラブルとその防止策について、実例を交えて紹介します。

#### 用語解説

- ※1 オーステナイト  
1種類以上の元素を含むγ鉄固溶体。
- ※2 経年変形  
室温で長い年月の間に材料の寸法・形状が変化すること。
- ※3 炭化物  
炭素と1つまたはそれ以上の金属元素との化合物。
- ※4 焼もどし軟化抵抗  
焼入れした鋼を焼もどすると、一般に硬さは低くなるが、この軟化の度合いを遅らせる働きをいう。